

Année 1965

N° d'ordre : 202

# THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

**Renaud ISAAC**

Ingénieur E. N. S. R. G.

---

PREMIÈRE THÈSE

**Etude et réalisation  
d'appareils amplificateurs à compensation  
pour l'éducation de la parole  
des enfants atteints de surdité profonde**

---

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

---

**Soutenues le 7 Juillet 1965, devant la Commission d'Examen.**

---

**MM. R. BERNARD**

Président

**L. EYRAUD**

**J.-C. LAFON**

**P. MOUNIER-KUHN**

**M. RICHARD**

} Examinateurs

---

**LYON**

Imprimerie BOSC Frères  
42, quai Gailleton, 42

---

1965



# THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

PAR

**Renaud ISAAC**

Ingénieur E. N. S. R. G.

PREMIÈRE THÈSE

**Etude et réalisation  
d'appareils amplificateurs à compensation  
pour l'éducation de la parole  
des enfants atteints de surdité profonde**

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 7 Juillet 1965, devant la Commission d'Examen.

MM. R. BERNARD

Président

L. EYRAUD  
J.-C. LAFON  
P. MOUNIER-KUHN  
M. RICHARD

Examineurs

LYON

Imprimerie BOSC Frères  
42, quai Gailleton, 42

1965





UNIVERSITE DE LYON

FACULTE DES SCIENCES

Doyens Honoraires

MM. LONGCHAMBON, MOUSSA, GAUTHIER Henri.

Professeurs honoraires

MM. LOCQUIN, de LARAMBERGUE, SOLLAUD, MENTZER, MOUSSA, JAFFARD  
EYRAUD Henri, DEJARDIN, VIRET.

Doyen

M. BRACONNIER

Assesseurs

MM. MESNARD et BOIDIN

Professeurs

|                 |                                    |
|-----------------|------------------------------------|
| MM. LONGCHAMBON | Minéralogie                        |
| PRETTRE         | Chimie Industrielle                |
| COURTY          | Chimie-Physique                    |
| KUHNER          | Botanique                          |
| MALECOT         | Mécanique rationnelle et appliquée |
| PARIS           | Chimie minérale                    |
| AUMERAS         | Chimie générale II                 |
| COLONGE         | Chimie organique                   |
| JANIN           | Physique générale                  |
| FLANDRIN        | Géologie appliquée                 |
| BERNARD         | Physique Industrielle              |
| DUFAY Jean      | Astronomie                         |
| NIGON           | Zoologie expérimentale             |
| GAUTHIER Henri  | Géologie générale                  |
| WAUTIER         | Zoologie                           |
| CHOPIN          | Chimie biologique                  |
| CUEILLERON      | Chimie                             |
| BRACONNIER      | Calcul différentiel et intégral    |

|                    |                                       |
|--------------------|---------------------------------------|
| EYRAUD Charles     | Chimie-Physique appliquée             |
| SARAZIN            | Physique Nucléaire                    |
| BOCIDIN            | Microbiologie et Mycologie            |
| PERES              | Physiologie                           |
| MESNARD            | Electronique                          |
| GRANDMONTAGNE      | Physique                              |
| BOUTILLIER         | Minéralogie                           |
| LAFOUCRIERE        | Physique nucléaire théorique          |
| DREUX              | Chimie organique                      |
| TEICHNER           | Chimie industrielle                   |
| PAVANS de CECCATTY | Zoologie                              |
| MERLIN             | Chimie analytique                     |
| DUFAY Maurice      | Physique de l'Atmosphère              |
| PHILIBERT          | Physique nucléaire                    |
| COHEN-ADAD         | Chimie                                |
| DAVID Louis        | Géologie générale                     |
| CHANEL             | Psychophysiologie                     |
| MAURY              | Méthodes mathématiques de la Physique |
| DEPRAZ             | Physique nucléaire                    |
| GAUTHIER Jean      | Chimie                                |
| GAUME              | Physique expérimentale                |

#### Professeurs sans chaire

|               |                                 |
|---------------|---------------------------------|
| MM. FERON     | Mathématiques                   |
| LAFORGUE      | Physique                        |
| LEGAY         | Zoologie expérimentale S.P.C.N. |
| UZAN          | Physique S.P.C.N.               |
| CHENEVOY      | Géologie appliquée              |
| GINET         | Zoologie                        |
| ASCH          | Physique                        |
| MICHEL Pierre | Minéralogie                     |
| DUCET         | Biologie végétale               |
| Me MAITROT    | Physique                        |
| GEVIN         | Géologie générale               |
| PONASSE       | Mathématiques                   |

MM. d'INCAN  
LEFEBVRE  
PERNET  
CHERY  
BERGEON  
M<sup>le</sup> GAUTHERON  
DESCOTES  
ERBEIA  
M<sup>me</sup> ERICSON  
LEMOIGNE

Physique  
Mathématiques  
Mathématiques  
Physique  
Physique C.S.U.  
Chimie biologique  
Chimie organique  
Physique  
Physique générale  
Botanique

Maîtres de Conférences

MM. MARTEL  
MATHIEU  
PICARD Philippe  
DEMARCO  
MICHEL Georges  
LEBRETON  
DAVID Jean  
TOUSSET  
FEUVRAIS  
PICARD Claude  
SCHMITT  
LAURENT  
ROT  
BETHOUX  
M<sup>le</sup> CALAIS  
GUSAKOW  
M<sup>le</sup> THOMAS

Mécanique  
Mécanique des Fluides  
Mathématiques  
Géologie générale  
Biochimie  
Biologie végétale  
Biologie animale  
Chimie propédeutique  
Physique Electricité  
Mathématiques  
Physique M.P.C.  
Chimie organique  
Mathématiques  
Mathématiques T.M.P.  
Mathématiques C.S.U.  
Physique  
Chimie Minérale

Maître de Conférences adjoint

M. PIERRON

Chimie

Conseiller Administratif

M. BURNET

Secrétaire Principal Honoraire

M. ROUX

=====



Ce travail a été effectué au Département de Physique de l'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, dans le laboratoire de Monsieur le Professeur L. EYRAUD. Les essais ont été effectués à l'INSTITUT D'AUDIOPHONOLOGIE DE LA FACULTE DE MEDECINE DE LYON, dirigé par Monsieur le Professeur P. MOUNIER-KUHN.

Nous tenons en premier lieu à remercier ici le Docteur J.C. LAFON, chargé de recherches au C.N.R.S., qui est à l'origine de notre travail et qui nous a constamment guidé et conseillé dans nos recherches chaque fois qu'il nous était nécessaire de tenir compte des impératifs de la phonétique ou de la physiologie et de la pathologie de l'audition. Sans sa constante collaboration, notre travail serait resté stérile.

Nous remercions de son aide amicale Monsieur M. RICHARD, Maître de Conférences à l'I.N.S.A., qui nous a soutenu dans la première phase de nos recherches.

Monsieur le Professeur R. BERNARD, qui s'est intéressé à notre travail, nous fait l'honneur d'accepter de présider notre Jury. Qu'il soit assuré de notre respectueuse gratitude.

Nous assurons de notre reconnaissance Monsieur le Professeur L. EYRAUD pour nous avoir procuré le sujet de notre étude et pour s'être constamment préoccupé de l'état d'avancement de notre travail.

Nous exprimons aussi toute notre reconnaissance à Monsieur le Professeur P. MOUNIER-KUHN pour la bienveillance avec laquelle il s'est intéressé à nos recherches et pour l'honneur qu'il nous fait en prenant part à notre Jury.

Nous ne saurions oublier que c'est grâce à Madame H. MERVANT que nous pouvons publier des résultats qui sont dûs en grande partie à sa compétence et à sa patience. Qu'elle trouve ici l'expression de nos remerciements.

.../...

Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance à tous nos camarades de laboratoire pour le climat sympathique qu'ils ont su créer et pour l'aide qu'ils nous ont apportée.

Enfin, nous remercions également Madame BELLACLAT et Mademoiselle E. TEILLARD pour les travaux de dessin et de dactylographie qu'elles ont effectués avec compétence et efficacité.

-----

## INTRODUCTION

Le travail que nous présentons s'inscrit dans les recherches effectuées depuis quelques années par le Docteur J.C. LAÏON en vue de l'utilisation maximale des restes auditifs du sourd profond.

Nous entendons par surdité profonde une diminution de la faculté auditive trop importante pour être compensée efficacement par les prothèses auditives actuellement commercialisées, si perfectionnées soient-elles.

Précisons toutefois que notre travail ne concerne pas, du moins pour l'instant, les cas de "surdité acquise" de l'adulte (surdités "de vieillesse"). Les prothèses classiques sont d'ailleurs le plus souvent suffisantes pour ces applications.

La surdité profonde est généralement congénitale. Il naît chaque année en France environ 500 enfants sourds profonds.

Les cas de surdité totale, c'est-à-dire dénués de tout reste auditif exploitable, sont beaucoup plus rares : moins de 10 par an pour la France. Dans la majorité des cas, il s'agit d'ailleurs de surdités acquises, par exemple post-méningitiques.

Dans les pages qui suivent, nous exposerons tout d'abord quelques considérations sur la nature physique du message acoustique de la parole.

Puis nous présenterons une comparaison entre les facultés auditives de l'individu normal et du sourd profond et nous poserons le problème de l'amplification adaptée au sourd profond.

Nous décrirons ensuite les appareils que nous avons réalisés qui, grâce à une utilisation efficace des restes auditifs, permettent l'acquisition du langage et offrent une aide importante pour la compréhension de la parole chez l'enfant sourd profond. Ces appareils sont destinés à être utilisés par les orthophonistes et rééducateurs des instituts spécialisés pour enfants sourds.

Nous exposerons aussi les résultats obtenus avec l'un de nos appareils qui fonctionne depuis trois ans dans une école de la région parisienne.

Nous terminerons en dégageant les perspectives de réalisation industrielle en petite série ainsi que l'éventuelle adaptation du principe à des prothèses auditives adaptées au sourd profond.

## CHAPITRE I

### STRUCTURE PHYSIQUE DU MESSAGE ACOUSTIQUE DE LA PAROLE

=====

L'analyse complète du message acoustique de la parole nécessite l'étude, d'une part de sa nature objective, c'est-à-dire de sa structure physique, d'autre part de sa nature subjective qui intéresse aussi le mécanisme de l'audition.

Nous exposerons rapidement dans ce chapitre des considérations relatives à la structure physique du message acoustique de la parole.

#### A - GENERALITES

La parole est un message, c'est-à-dire une somme d'informations qui se succèdent dans le temps. Comme tout message, elle suppose une émission, une transmission et une réception.

Le support physique de la transmission est l'air par l'intermédiaire de ses vibrations, que nous appelons sons.

L'étude de la parole en tant que succession de sons peut se faire indépendamment de toutes considérations sur son émission (phonation) et sa réception (audition).

Pour étudier les vibrations de l'air, on les transforme en vibrations électriques équivalentes au moyen d'un microphone.

Comme ces vibrations sont très complexes, surtout dans le cas de la parole, il existe de nombreux moyens pour leur étude, tous plus ou moins imparfaits, correspondant aux différents appareillages et méthodes utilisés.

#### B - ANALYSE SPECTRALE INSTANTANEE

En général, un son n'est pas sinusoïdal, ni même périodique. Si l'on se limite cependant aux sons purs sinusoïdaux, on constate qu'ils ne peuvent être perçus par un individu normal que si leur fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 KHz environ.

C'est pour cette dernière raison que l'on se limite, pour l'étude des sons, à leurs composantes comprises dans cette bande de fréquence.

Il est en effet possible de parler de composantes fréquentielles car on sait que l'on peut définir pour toute fonction continue du temps un spectre de FOURIER "instantané" (en réalité pseudo-instantané).

L'étude de la décomposition fréquentielle instantanée et de son évolution dans le temps est riche d'enseignements sur la structure de la parole et sur le mécanisme de son émission.

Elle est en tout cas l'un des moyens les plus féconds utilisés à cette fin.

Cette étude est possible grâce à un appareil appelé "SONAGRAPH" fabriqué aux U.S.A. par la "KAY ELECTRIC CO." et sur lequel nous reviendrons.

Lorsque l'on analyse la parole avec cet appareil, on constate qu'il existe plusieurs types de spectres instantanés :

1°) Des spectres fortement discontinus, montrant la présence d'un son fondamental et de ses harmoniques, c'est-à-dire d'un son périodique. On constate que ce type de spectre correspond en général aux voyelles, dont la définition phonétique sera donnée plus loin.

Il est prouvé que la fréquence du son fondamental est celle de la vibration produite au niveau du larynx par les "cordes vocales". Cette vibration est appelée son laryngé, sa fréquence est appelée fondamental laryngé.

D'autre part, l'examen du spectre instantané d'une voyelle montre la présence de zones fréquentielles de renforcement des harmoniques. Ces zones, au nombre de deux au moins, sont appelées zones formantiques ou plus simplement formants. Les formants d'une voyelle sont caractéristiques de cette voyelle car ils déterminent son timbre, indépendamment de la fréquence du fondamental laryngé.

2°) Des spectres continus plus ou moins réguliers, correspondant à des sons non périodiques, c'est-à-dire à des bruits. On constate que ces spectres correspondent à des consonnes. On y trouve souvent des zones fréquentielles de renforcement que l'on dénomme aussi par extension formante.

3°) Des spectres à la fois continus et discontinus, c'est-à-dire formés de la superposition des deux types déjà décrits. Ils correspondent le plus souvent à des consonnes que l'on appelle sonores car elles comportent du son laryngé (exemple /g/). Par opposition, les consonnes à spectre continu sont qualifiées de sourdes (exemple /k/).

### C - PHONETIQUE ACOUSTIQUE

On appelle phonème un symbole unitaire de la parole dont la représentation est habituellement effectuée par un timbre déterminé et son image évoquée dans l'esprit du sujet.

On distingue deux catégories de phonèmes :

- les voyelles formées uniquement à partir du son laryngé
- les consonnes caractérisées par des bruits et par des sons qui ont soit une intensité moindre que les voyelles, soit une durée inférieure, soit les deux à la fois.

1°) Les voyelles sont produites à l'aide du son laryngé dont le timbre, c'est-à-dire la répartition des amplitudes des harmoniques, est modifié par les résonateurs supralaryngés : pharynx et bouche.

Les fréquences limites du résonateur pharyngé se situent vers 200 et 800 Hz, celles du résonateur buccal vers 700 et 4000 Hz.

La fréquence - ou hauteur- du formant pharyngé dépend de l'ouverture de la cavité buccale, alors que celle du formant buccal dépend de la position de la langue : plus le point d'articulation de la langue est antérieur, plus le formant est aigu.

Le formant buccal est le plus important pour l'identification du phonème.

2°) Les consonnes peuvent être sourdes ou sonores (ou encore dures ou douces) suivant qu'elles sont composées uniquement de bruit

(sourdes) ou de son laryngé et de bruit, ou même de son laryngé uniquement (sonores).

On distingue aussi :

a) les occlusives caractérisées par une période de tension (la tenue) suivie d'une explosion brusque (tel le /p/).

La tenue est silencieuse pour une explosive sourde (/g/), ou sonorisée par un grondement laryngé pour une explosive sonore (/b/). Le timbre des explosives est grave pour les "labiales" (/p/, /b/), plus aigu pour les "dentales" (/t/, /d/) et encore plus pour les "gutturales" (/k/, /g/), 3000 Hz environ).

b) les spirantes caractérisées par un bruit d'écoulement (tel le /s/ ou le /ch/) buccal ou labial. Elles sont également sourdes (/s/, /ch/, /f/) ou sonores (/z/, /j/, /v/). Leur spectre est en général situé dans l'aigu (le /s/ commence à 3000 Hz, souvent à 6000 Hz).

c) Les liquides (/l/ et /r/) et les nasales (/m/ et /n/) caractérisées par du son laryngé avec des zones formantiques marquées par la bouche.

d) Il existe encore quelques variétés de consonnes, tel / $\tilde{n}$ /, qui a une structure plus complexe et /y/ qui se rapproche de la voyelle /i/.

## CHAPITRE II

### ETUDE COMPAREE DE LA PERCEPTION DE LA PAROLE CHEZ L'INDIVIDU NORMAL ET CHEZ LE SOURD PROFOND

#### A - SURDITE ACQUISE ET SURDITE CONGENITALE

Le problème que pose la surdité est très différent chez l'adulte et chez l'enfant.

Le premier a acquis, grâce à l'audition intacte dès l'enfance, le sens de l'ouïe. Il a pu structurer son langage, c'est-à-dire acquérir à partir des sons perçus la notion de symbole phonétique sur laquelle reposent les mots, les phrases et les idées portées par ces dernières.

L'enfant sourd, atteint souvent congénitalement, n'a en revanche aucune possibilité de recevoir l'image sonore, donc d'apprendre à connaître et à identifier la parole d'autrui. Gêné dans le contact social, il l'est encore plus dans l'acquisition du langage.

Si l'enfant normal met plusieurs années pour parler en ayant à sa disposition le message intact de la communication humaine, comment le jeune sourd peut-il arriver à acquérir le langage alors qu'il est réduit au mouvement des lèvres et aux gestes qui ne permettent guère que l'approche du concret et de l'objet, mais non celle de l'abstrait et de l'idée combien spécifique du langage humain ?

Les techniques actuelles de rééducation permettent une suppléance par des moyens variés : tactiles, gestuels, visuels, grâce à des éducateurs dont la patience n'est pas la moindre qualité. Elles sont entreprises habituellement à l'âge scolaire, car c'est à cet âge que l'Etat prend en général en charge l'éducation de l'enfant normal. Cet âge est beaucoup trop avancé, la plasticité du système nerveux n'étant plus la même, et l'acquisition du langage étant définitivement entravée quelles que soient les méthodes employées. Il est donc nécessaire que la rééducation du sourd soit entreprise aussi précocement que possible.

.../...

## B - LA SURDITE PROFONDE

Il existe différents degrés dans la surdité de l'enfant, et aussi différentes variétés d'altérations.

Celles qui intéressent notre travail sont les surdités profondes où le seuil d'audition est trop élevé pour être accessible de façon valable aux prothèses auditives actuellement commercialisées.

Les restes auditifs sont habituellement localisés dans les zones graves des audiofréquences, ne dépassant pas la limite supérieure de 1000 Hz. La perception s'améliore de 1000 Hz vers les sons plus graves, mais ces sons graves sont en-dehors de la bande de fréquences située entre 500 Hz et 4000 Hz et dénommée "zone conversationnelle" car c'est dans cette zone que se situent les fréquences utiles à l'identification des timbres de la parole.

Nous avons vu en effet (chapitre I) que la parole est formée de phonèmes caractérisés par un spectre instantané. Pour que ces phonèmes soient identifiés, on constate qu'il est nécessaire qu'une partie de leur spectre soit perçu, tout spécialement la zone la plus caractéristique du phonème (telle la zone aiguë du /s/), et il se trouve que les zones les plus importantes se situent entre 800 et 4000 Hz.

Le sourd profond ne peut donc rien en percevoir, même si l'on amplifie les sons pour les lui rendre perceptibles puisque les zones importantes ne peuvent jamais être perçues quelle que soit leur amplification.

## C - MECANISME DE L'AUDITION

### 1°) Structures complexes de la parole

Pour comprendre la parole, l'identification de tous les phonèmes successifs considérés individuellement n'est ni nécessaire, ni suffisante.

Il entre en effet dans le mécanisme de l'audition d'autres facteurs liés aux structures complexes de la parole.

Nous avons vu qu'un phonème est caractérisé par un spectre instantané. Or tout dans la parole est variation et mouvement. Le changement continu de timbre et de structure acoustique introduit des éléments d'information qui, sans permettre l'identification d'un phonème déterminé, viennent considérablement aider à la reconnaissance de structures complexes tels la syllabe et plus encore le mot ou la phrase. La suppléance mentale vient interférer pour favoriser et hâter la reconnaissance de l'idée apportée par le message-parole.

a) rôle de l'intensité

Lorsqu'on étudie la courbe d'intensité d'un mot, c'est-à-dire la courbe enveloppe du signal microphonique correspondant, on s'aperçoit surtout au sein d'une phrase que cette courbe est très semblable d'un locuteur à l'autre.

Avec beaucoup d'entraînement, on pourrait donc distinguer entre eux par la seule courbe d'intensité deux mots de même durée sans autre élément acoustique ou linguistique d'information.

La connaissance de l'intensité joue donc un rôle important dans la forme évoquée par les sons, c'est-à-dire dans l'image abstraite que l'on se fait de la représentation acoustique d'un mot.

Dans une surdité profonde, très peu d'éléments intensité peuvent être perçus.

b) rôle du son laryngé

Le mot et la phrase comportent aussi une mélodie, c'est-à-dire une évolution de la fréquence fondamentale du son laryngé.

Cette mélodie est relativement la même d'un sujet à l'autre pour le même mot ou pour la même phrase. Il faut bien sûr tenir compte des différences de hauteur données par le larynx chez l'homme (de 80 à 250 Hz), la femme (de 120 à 300 Hz) et l'enfant (de 150 à 400 Hz).

La mélodie contribue à donner sa forme à l'ensemble phonétique, donc elle peut éventuellement servir à l'identification de la parole. Il s'agit certes d'un élément peu informationnel, mais cependant contributif à la reconnaissance d'un ensemble.

## 2°) Les éléments d'information

Nous pouvons maintenant classer les éléments d'information que nous aurons à considérer dans notre étude.

Nous distinguerons deux groupes :

- les éléments d'information qui sont susceptibles d'une symbolisation et correspondent donc à une unité de langue : tels sont les phonèmes.

- les éléments d'information qui ne sont pas symbolisés, mais qui contribuent de façon significative à la structure du mot et de la phrase : le fondamental laryngé et l'intensité par exemple.

### a) les informations symbolisées

Elles sont données par la nature acoustique du support phonétique (son laryngé, bruit d'explosion ou d'écoulement) et par le spectre, autrement dit le timbre.

Ces données acoustiques sont symbolisées, c'est-à-dire qu'elles correspondent à une image mentale conventionnelle qui n'a aucun lien avec l'image concrète dont elle découle.

Donnons un exemple : pourquoi le timbre donné par des renforcements d'harmoniques vers 880 Hz et vers 1200 Hz évoque-t-il inmanquablement un "a" ? Parce que c'est ainsi que nous avons appris la convention. Mais nous pourrions tout aussi bien dire que "a" est représenté par un claquement de doigts ; il n'en perdrait aucune de ses qualités informationnelles.

Autrement dit, on peut très bien définir une autre convention que celle qui est habituellement utilisée, à condition qu'elle soit formellement reproductible, c'est-à-dire pour reprendre notre exemple que "a" soit toujours un claquement de doigts et jamais autre chose, et que le claquement de doigts ne représente que "a" dans notre convention.

Si donc on cherche à transformer les sons au moyen d'un appareil, les informations symbolisées pourront y changer de nature et de structure acoustique, pourvu qu'un phonème émis par un sujet soit toujours reproduit de la même façon par la machine qui sert à transmettre l'information.

b) les informations concrètes significatives

Pour celles-ci, il n'en est pas de même : elles doivent conserver leur nature acoustique puisqu'elles ne correspondent pas à une symbolisation, mais sont un complément de forme ajouté aux informations symbolisées. On ne peut donc transformer leur nature acoustique.

Or, elles correspondent au son laryngé dont le fondamental varie dans la parole entre 80 et 400 Hz suivant les sujets. Le fondamental laryngé peut donc, s'il est amplifié, être perçu par un sujet très sourd.

D'autre part, il se trouve que l'étendue vers les fréquences aiguës du spectre instantané est étroitement fonction de l'intensité du fondamental laryngé et de ses premiers harmoniques. En conséquence, il est possible de donner au sourd une image indirecte d'un timbre aigu par l'intensité et la hauteur du fondamental perçu.

Tels sont les différents éléments qui nous ont servi dans l'élaboration d'un appareil de transmission de la parole adapté au sourd profond.

### CHAPITRE III

#### AMPLIFICATEUR ADAPTE AU SOURD PROFOND : PREMIERE REALISATION

##### A - AMPLIFICATION ET SURDITE PROFONDE

Le problème posé est d'essayer de donner par voie acoustique quelques éléments informatifs à l'enfant atteint de surdité profonde. On contribuera ainsi à un développement plus rapide et plus esthétique de la voix et de la parole. On rendra plus aisée l'acquisition de la lecture labiale et on obtiendra par conséquent un développement plus grand et plus complet du langage individuel à un âge où la plasticité nerveuse permet des acquisitions indispensables à la formation de la pensée, donc à l'intelligence verbale de l'homme.

D'après ce que nous avons vu au chapitre II, nous pouvons envisager deux étapes de recherche : étant donné que le sourd profond ne possède en général qu'un reste d'audition pour les sons graves dont le seuil est d'autant plus élevé que le son est moins grave, nous devons d'abord savoir s'il est possible pour le sujet de percevoir des informations sonores différenciées dans cette bande de fréquence réduite, puis si les informations normalement contenues dans les zones graves peuvent être valablement augmentées artificiellement, et dans l'affirmative quelles peuvent être la quantité optimale et la valeur maximale possibles d'informations codées.

##### 1°) Les informations dans la zone grave

L'origine de la perception des sons très graves chez le sourd profond est controversée. Certains pensent que les cellules sensorielles auditives ne sont pas impressionnées et qu'il s'agit d'une simple sensation vibratoire perçue grâce au système vestibulaire d'équilibration. D'autres pensent, bien que la sensation

vibratoire puisse intervenir, qu'il s'agit encore d'audition et que ces reliquats peuvent être utilisés comme voie d'information acoustique.

Afin de vérifier cette dernière donnée avant d'entreprendre une étude plus approfondie, J.C. LAFON et J. MERVANT (4) ont fait construire un appareil amplificateur spécial dont la bande passante couvre de 50 Hz à 800 Hz. Il correspond donc aux restes auditifs du sourd profond. L'amplification peut atteindre une telle puissance que l'oreille normale perçoit pour les sons très graves la sensation tactile de déplacement du tympan.

Avec cet appareil, on a entraîné deux enfants :

- l'un âgé de 14 ans, avait une surdité profonde acquise à l'âge de 6 ans
- l'autre, dont la surdité date d'avant le développement de la parole, était une enfant âgée de 5 ans.

Grâce à cet appareil, le premier enfant est arrivé, après entraînement, à distinguer avec un nombre d'erreurs réduit trente mots différents de même longueur phonétique dans la même phrase. Le sujet n'avait à sa disposition comme information que le son fondamental laryngé, sa hauteur et sa variation d'intensité dans le temps, compte-tenu de ses restes auditifs et du spectre de la parole.

La deuxième enfant a pu acquérir rapidement une bonne lecture labiale, une hauteur de voix et de mélodie de la phrase proches de celles d'un entendant.

## 2°) Information artificielle

Fort de ces résultats, le docteur LAFON nous a posé le problème technique d'augmenter les éléments d'information dans la bande de fréquences perçue par le sujet sourd. C'est le point qui a servi de départ à notre étude.

## B - PRINCIPE DU PREMIER APPAREIL REALISE (1) (2) (3)

Le premier procédé qui a été envisagé concerne l'intensité : il consiste à donner une nouvelle forme globale aux mots et aux phrases semblable à celle de la parole normale, mais dans la seule zone grave perçue.

Ce principe suppose qu'un son grave soit injecté dans le système amplificateur chaque fois qu'un son aigu, non perçu, se présente dans le signal microphonique.

### 1°) le Filtrage

Il est d'autre part nécessaire d'effectuer un énergique filtrage du type passe-bas pour conserver les qualités de l'appareil LAFON-MERVAULT, concernant les informations dans la zone grave. En effet, on pourrait croire qu'une énergique amplification linéaire (donc non filtrée) suffirait à fortiori pour transmettre les basses fréquences seules perçues par le sourd profond.

Ce serait oublier qu'à partir d'un niveau de 110 dB, on risque un traumatisme sonore de l'oreille interne, ou tout au moins, une sensation douloureuse. Comme les zones fréquentielles les plus sensibles se situent entre 2000 et 5000 Hz\*, il en résulte que plus le son est grave, moins le risque de traumatisme ou de douleur est grand. D'où la nécessité du filtrage.

### 2°) Le son de compensation

Le rôle du son de compensation est donc de créer artificiellement une restitution de la courbe enveloppe à l'intérieur des limites de la bande fréquentielle perçue par le sourd profond.

Pour des raisons de simplicité, nous avons décidé de prendre comme son de compensation un son pur sinusoïdal. Sa fréquence doit bien entendu être perçue. De plus, elle ne doit jamais

\* Notons à ce propos l'erreur très fréquente de nombreux ouvrages qui affirment que l'oreille est plus sensible à la douleur aux fréquences très graves et très aiguës qu'aux fréquences médium.

masquer le fondamental laryngé. En conséquence, la fréquence du son de compensation doit être comprise entre environ 500 Hz et la limite supérieure du champ perçu (700 à 1200 Hz suivant les sujets).

En ce qui concerne son intensité, elle doit à chaque instant être telle que la courbe enveloppe du signal de sortie de l'appareil soit identique à la courbe enveloppe du signal microphonique initial.

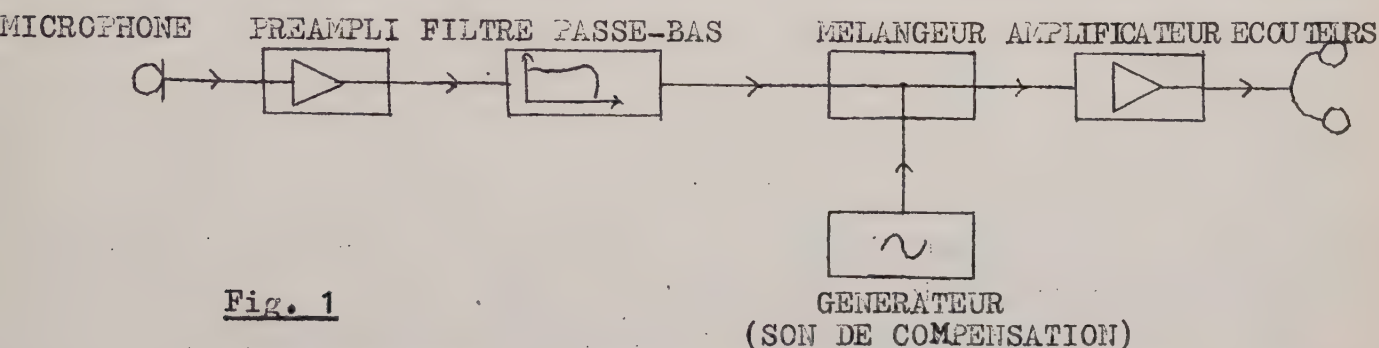


Fig. 1

Le schéma-bloc (fig. 1) rend compte du principe de base de l'appareil : le signal microphonique, après préamplification, traverse un filtre passe-bas avant d'être mélangé avec le signal de compensation.

Le résultat du mélange est finalement amplifié dans un amplificateur de puissance suffisante, puis envoyé dans les écouteurs. Reste à trouver le moyen de doser -c'est-à-dire de moduler- l'amplitude du son de compensation.

### C - DESCRIPTION

Le premier moyen que nous avons employé utilise un asser-vissement qui comporte (fig. 2) :

- un signal d'ordre lié à l'intensité instantanée de la courbe enveloppe avant filtrage.
- un signal de retour lié à l'intensité instantanée de la courbe enveloppe après mélange.
- un comparateur fournissant le signal d'erreur
- un modulateur.

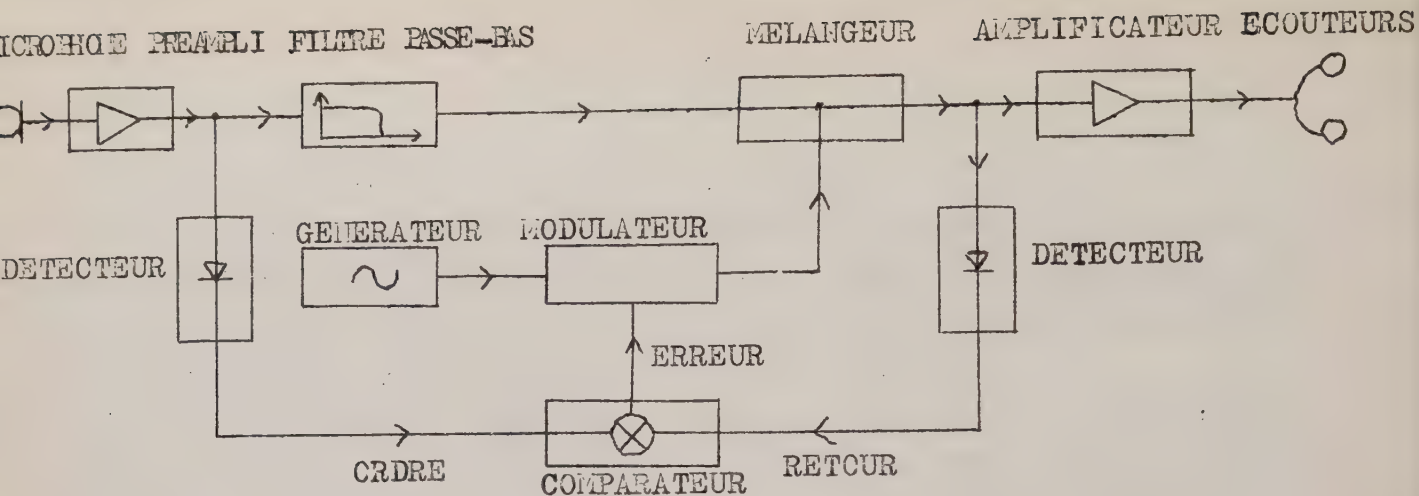


Fig. 2

Le signal d'ordre et le signal de retour sont élaborés par deux circuits de détection d'enveloppe.

Après comparaison -c'est-à-dire soustraction- on obtient le signal d'erreur. Celui-ci commande le modulateur chargé de doser le signal de compensation issu d'un générateur basse-fréquence.

Le fonctionnement est le suivant :

- lorsque le signal microphonique initial n'a pas de composante fréquentielle supérieure à 800 Hz, il est intégralement transmis par le filtre; il en résulte que les signaux d'ordre (enveloppe du signal initial) et de retour (enveloppe du signal filtré) sont identiques. Le signal d'erreur est donc nul et le modulateur est bloqué ; il n'y a pas de son de compensation.

- si, au contraire, le signal microphonique comporte des composantes fréquentielles supérieures à 800 Hz, il est déformé, et en moyenne atténué, après filtrage.

Le signal d'ordre devient supérieur au signal de retour et le signal d'erreur n'est plus nul : le modulateur transmet donc le signal issu du générateur basse fréquence, ce qui a pour effet de diminuer l'écart entre les courbes enveloppe d'entrée et de sortie. Cet écart est d'autant plus faible que le gain de la boucle d'asservissement est élevé :

.../...

Comme tout asservissement, cet ensemble présente des avantages et des inconvénients :

- avantages : on obtient une excellente proportionnalité entre les intensités des signaux de sortie et d'entrée, quelle que soit la fréquence : le son de compensation est toujours dosé de façon telle qu'il comble exactement l'atténuation apportée volontairement par le filtre passe-bas aux fréquences élevées.

- inconvénients : dans tout asservissement, il faut réaliser un compromis entre la précision et la stabilité, lequel est très délicat à réaliser dans notre cas.

D'autre part, les circuits de détection d'enveloppe et du modulateur introduisent des retards dûs à leurs constantes de temps.

Or, une bonne rapidité de réponse du son de compensation est absolument indispensable pour respecter les éléments informationnels des transitoires.

#### D - CONCLUSION

Les inconvénients cités ci-dessus nous ont fait renoncer au principe séduisant de l'asservissement au profit d'une compensation en boucle ouverte plus apte à réaliser la rapidité de réponse souhaitée.

Nous ne nous étendrons pas plus sur ce premier appareil qui nous a donné des résultats certes encourageants, mais insuffisants pour être exploitables.



## CHAPITRE IV

### AMPLIFICATEUR ADAPTE AU SOURD PROFOND :

#### DEUXIEME ET TROISIEME REALISATION

#### A - PRINCIPE INITIAL (3)

La seule différence de principe avec notre premier appareil concerne le procédé de modulation du signal de compensation.

Pour obtenir une compensation en boucle ouverte, il suffit de remarquer que le son de compensation doit être "déclenché" par la présence dans le signal microphonique de composantes de fréquence supérieure à la fréquence de coupure du filtre passe-bas : c'est bien ainsi que l'on peut restituer la courbe d'intensité initiale.

Au lieu d'avoir recours à un asservissement, on peut donc plus simplement se servir d'un filtre passe-haut complémentaire du filtre passe-bas. Ce filtre passe-haut, attaqué lui aussi par le signal microphonique initial, transmet précisément les composantes aiguës atténuées par le filtre passe-bas. Ces composantes, une fois appliquées à un circuit détecteur d'enveloppe, fournissent un signal appliqué au modulateur. Le schéma-bloc correspondant est indiqué figure 3.

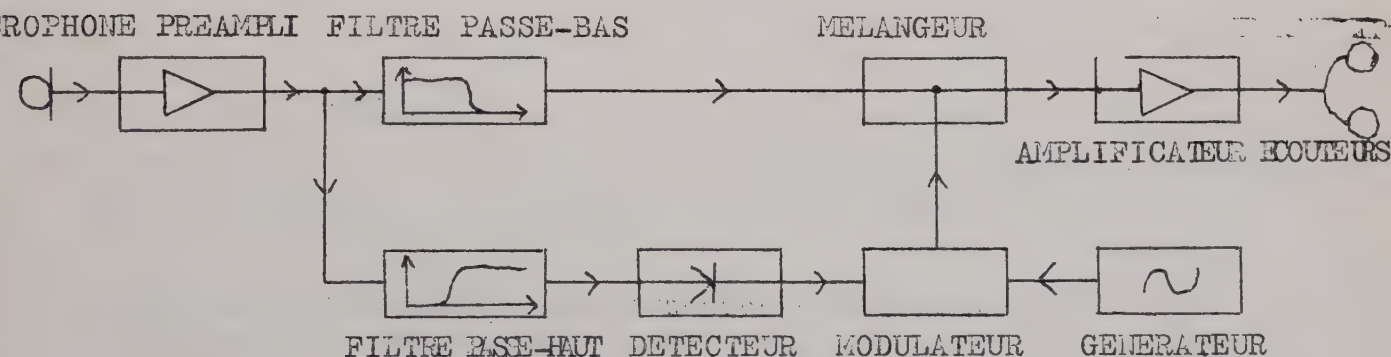


Fig. 3

On conçoit ainsi que dans la mesure où le filtre passe-haut est effectivement complémentaire du filtre passe-bas, un dosage correct permet d'obtenir une restitution fidèle de la courbe d'intensité.

## B - PRINCIPE AMELIORE (5)

Notre deuxième appareil une fois réalisé sur le principe ci-dessus, a été soumis à des essais systématiques pour connaître son comportement vis-à-vis des différents phonèmes.

Il nous est ainsi apparu que certains phonèmes, en particulier le /ch/ et le /j/, dont le spectre est uniforme sur une grande étendue de la partie aiguë des fréquences acoustiques, "déclenchaient" préférentiellement le son de compensation au détriment de tous les autres phonèmes, et en particulier de la spirante /s/ dont le spectre est plus étroit et plus aigu.

Nous en avons ainsi déduit la nécessité de modeler différemment la courbe de réponse du filtre passe-haut.

Des considérations théoriques sur les spectres des différents phonèmes ainsi que des essais successifs nous ont permis de sélectionner un type de courbe de réponse formé de deux courbes en cloche judicieusement choisies (fig. 4).

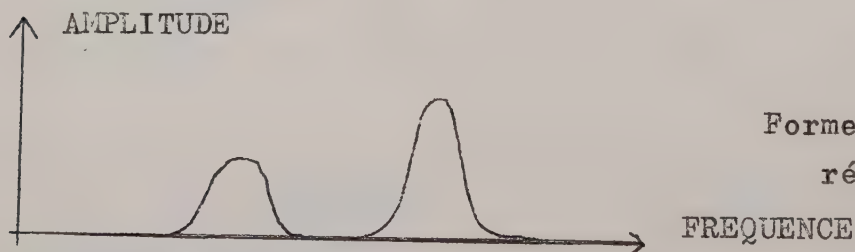


Fig. 4

Forme de la courbe de  
réponse choisie.

Ce type de courbe de réponse peut être facilement obtenu au moyen de deux "circuits bouchon" en série, possédant des fréquences de résonance et des coefficients de surtension adéquats.

Le schéma-bloc correspondant à ce principe amélioré est obtenu en substituant au filtre passe-haut de la figure 3 le double filtre passe-bande décrit ci-dessus.

## C - CHOIX DES COEFFICIENTS DE SURTENSION

Les fréquences de résonance choisies se situent respectivement vers 2700 Hz et 6000 Hz ; restent à déterminer les coefficients de surtension correspondants, ou, ce qui revient au même, les bandes passantes respectives des deux circuits bouchon.

Pour ceci, il importe de considérer le problème de la rapidité de réponse évoqué au chapitre III.

Etudions en effet le comportement d'un circuit bouchon vis-à-vis d'une excitation du type transitoire.

Soit le circuit oscillant représenté fig. 5.

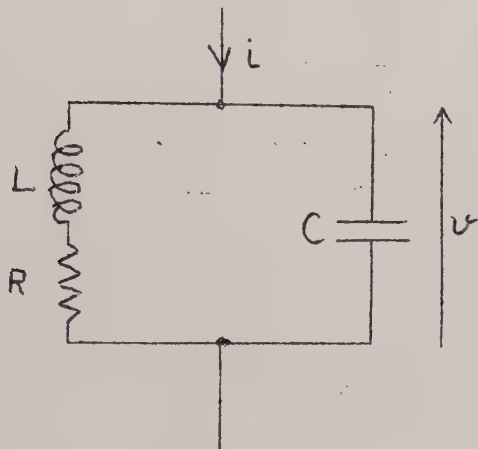


Fig. 5

Il comporte un bobinage de self induction  $L$  et de résistance  $R$  en parallèle avec un condensateur de capacité  $C$ . Soit  $i$  le courant d'excitation et  $v$  la tension qui apparaît aux bornes du circuit bouchon.

Appelons respectivement  $I$  et  $V$  les images opérationnelles de  $i$  et  $v$  dans la transformation de CARSON-LAPLACE, et soit  $Z$  l'impédance opérationnelle du circuit bouchon.

On peut écrire :

$$\frac{1}{Z} = Cp + \frac{1}{R + Lp}, \text{ soit } Z = \frac{R + Lp}{1 + RCp + LCp^2}$$

$$Z = \frac{1}{C} \times \frac{p + \frac{R}{L}}{p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC}}$$

Supposons que  $R$  est inférieur à la résistance d'amortissement critique, cette condition s'écrit  $\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} > 0$

Nous pouvons alors poser :  $p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = (p+a)^2 + \omega_0^2$

$$\text{avec } a = \frac{R}{2L} \text{ et } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

Il vient alors :  $Z = \frac{1}{C} \times \frac{p + 2a}{(p + a)^2 + \omega_0^2}$

Nous pouvons maintenant calculer la réponse du circuit à diverses excitations.

a) Réponse à la fonction percussion unité, ou fonction de DIRAC d'ordre 1.

On a  $I = p \times q_0$ ,  $q_0$  ayant les dimensions d'une quantité d'électricité; donc :  $V = ZI = \frac{q_0}{C} \times \frac{p^2 + 2ap}{(p + a)^2 + \omega_0^2}$

On en déduit aisément :

$$v = \frac{q_0}{C} e^{-at} (\cos. \omega_0 t + \frac{a}{\omega_0} \sin. \omega_0 t)$$

On obtient une fonction sinusoïdale amortie exponentiellement.

La constante de temps d'amortissement vaut  $\tau = \frac{1}{a} = \frac{2L}{R}$

En posant  $Q = \frac{L\omega_0}{R}$  et  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ , on obtient :

$$\tau = 2 \times \frac{L\omega_0}{R} \times \frac{1}{\omega_0} = 2 Q \frac{T_0}{2\pi} = \frac{Q}{\pi} T_0$$

$$\boxed{\tau = \frac{Q}{\pi} T_0}$$

b) Réponse à une fonction sinusoïdale de pulsation  $\omega$ , commençant à l'instant 0

On a (  $i = 0$  pour  $t < 0$

(  $i = I_0 \sin \omega t$  pour  $t > 0$

(fig.6)

d'où :  $I = I_0 \times \frac{p \omega}{p^2 + \omega^2}$

soit :  $V = ZI = \frac{I_0 \omega}{C} \times \frac{p^2 + 2ap}{[(p + a)^2 + \omega_0^2] (p^2 + \omega^2)}$

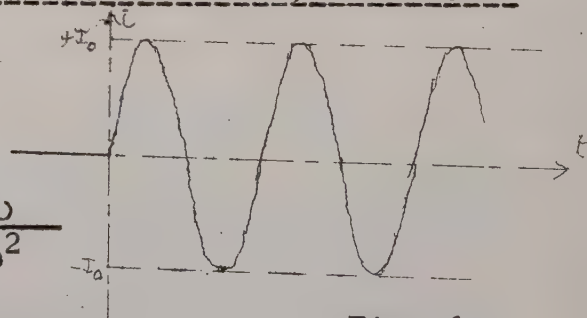


Fig. 6

La décomposition en éléments simples fournit :

$$V = \frac{I_0 \omega}{C} \times \frac{1}{(\omega^2 - \omega_0^2)(\omega^2 - \omega_0^2 - a^2) + 4a^2 \omega^2} \left[ \frac{\alpha p + \beta}{(p+a)^2 + \omega_0^2} + \frac{\gamma p + \delta}{p^2 + \omega^2} \right]$$

$$\begin{aligned} \text{avec : } \alpha &= -2a(a^2 + \omega_0^2) \\ \beta &= -(\omega^2 - \omega_0^2 + 4a^2)(a^2 + \omega_0^2) \\ \gamma &= 2a(a^2 + \omega_0^2) \\ \delta &= \omega^2(\omega^2 - \omega_0^2 + 4a^2) \end{aligned}$$

La transformation inverse donne finalement :

$$v = \frac{I_0 \omega}{C} \frac{1}{[(\omega^2 - \omega_0^2)(\omega^2 - \omega_0^2 - a^2) + 4a^2 \omega^2]} \times [Ae^{-at} + B]$$

$$\text{avec } A = \frac{a}{\omega_0} (\omega^2 - 3\omega_0^2 + 2a^2) \sin \omega_0 t + (\omega^2 - \omega_0^2 + 4a^2) \cos \omega_0 t$$

$$B = \frac{2a}{\omega} (a^2 + \omega_0^2) \sin \omega t - (\omega^2 - \omega_0^2 + 4a^2) \cos \omega t$$

On obtient la somme d'un régime sinusoïdal permanent de pulsation  $\omega$  et d'une fonction sinusoïdale amortie de pulsation  $\omega_0$ .

La constante de temps d'amortissement est ici encore :

$$\left\{ \tau = \frac{1}{a} = \frac{Q}{\pi} T_0 \right\}$$

Dans le cas particulier où le signal sinusoïdal d'excitation est de pulsation  $\omega_0$ , on obtient :

$$v = \frac{Q I_0}{C \omega_0} \left[ (1 - e^{-at}) \left( \sin \omega_0 t - \frac{1}{Q} \cos \omega_0 t \right) + (1 + e^{-at}) \frac{1}{4Q^2} \sin \omega_0 t \right]$$

En négligeant le terme en  $\frac{1}{Q^2}$ , il vient :

$$v = \frac{Q I_0}{C \omega_0} \sqrt{1 + \frac{1}{Q^2}} (1 - e^{-at}) \sin(\omega_0 t + \varphi) \text{ avec } \operatorname{tg} \varphi = -\frac{1}{Q}$$

Cette tension est représentée figure 7.

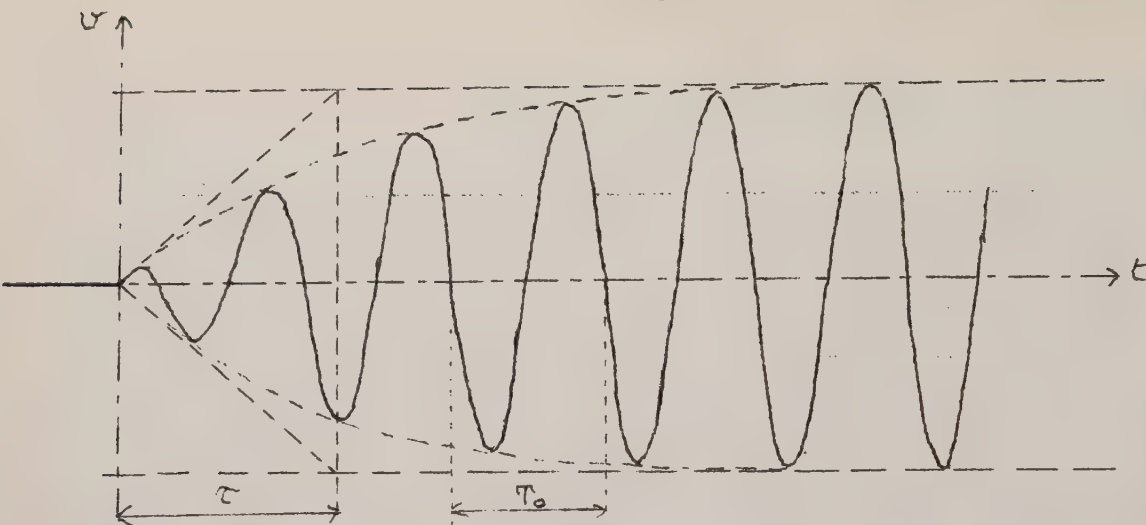


Fig. 7

On obtient une fonction sinusoïdale de pulsation  $\omega_0$  qui s'établit exponentiellement.

La constante de temps d'établissement est encore :

$$\left( \tau = \frac{Q}{\pi} T_0 \right)$$

En résumé, on peut affirmer que la réponse d'un circuit bouchon à une excitation transitoire présente toujours une période d'établissement caractérisée par la constante de temps propre du circuit, soit :  $\tau = \frac{Q}{\pi} T_0$ .

Dans le cas particulier du circuit de fréquence propre 2700 Hz, on a  $T_0 \neq 0,37$  ms. et si l'on veut que la constante de temps ne dépasse pas 1 ms., il faut que le coefficient de surtension ne dépasse pas  $Q = \pi \times \frac{1}{0,37} = 8,5$ .

Rien n'interdit, en revanche, de choisir un coefficient de surtension de valeur plus élevée pour le deuxième circuit bouchon, dont la fréquence de résonance est de 6000 Hz : en effet, une constante de temps de 1 ms. serait obtenue pour un coefficient de surtension de 19 environ.

Le choix se porte donc naturellement sur des coefficients de surtensions proportionnels aux fréquences propres, c'est-à-dire sur des bandes passantes égales.

## D - DESCRIPTION DU DEUXIEME APPAREIL REALISE

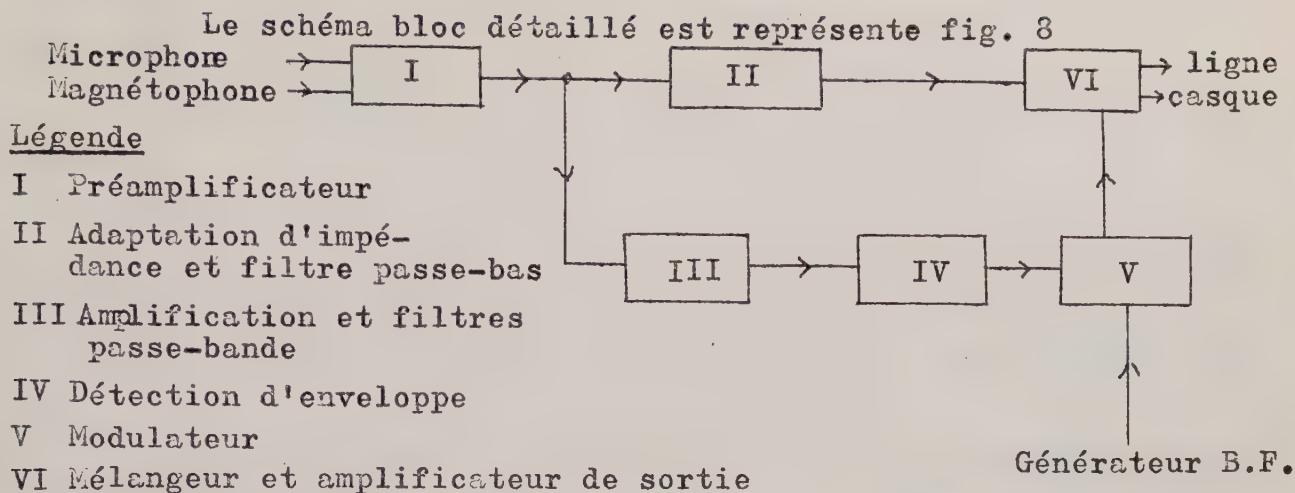


Fig. 8

Reprenons un à un les différents sous-ensembles de la fig. 8.

### 1°) Le préamplificateur (fig. 9)

Son rôle est d'amplifier linéairement le signal d'entrée jusqu'à un niveau suffisant pour attaquer correctement les circuits suivants.

Il est prévu une entrée pour microphone, de sensibilité 2 mVeff, et une entrée moins sensible pouvant convenir pour un signal à haute impédance provenant indifféremment d'un magnétophone ou d'un tourne-disque à tête piezo-électrique.

Les deux entrées sont mélangeables grâce à un montage utilisant deux triodes avec charge commune.

Les gains maxima pour les voies micro et magnétophone sont respectivement de 74 dB ( $\times 5000$ ) et 26 dB ( $\times 20$ ).

Le bruit de fond ramené à l'entrée micro est de 5  $\mu$ V.

### 2°) Le filtre passe-bas et son circuit d'attaque (fig. 10)

Le filtre utilisé, de marque SECRE, référence Fb 1225, ayant une impédance nominale de 10 K $\Omega$ , doit être fermé sur cette impédance. Dans ces conditions, la courbe de réponse est celle de la figure 11. L'impédance d'entrée du filtre varie beaucoup avec la fréquence. Elle peut descendre jusqu'à des valeurs inférieures à 10 K $\Omega$ . Pour attaquer correctement le filtre en tension, il

convient d'utiliser à l'entrée du filtre un circuit d'impédance de sortie nettement inférieure à cette valeur.

C'est la raison pour laquelle nous utilisons un circuit à charge de cathode avec les deux triodes d'un tube ECC82.

La charge de cathode de  $6800\Omega$  et la pente de  $2 \times 2,2 = 4,4$  mA/V donnent une impédance de sortie de l'ordre de  $200\Omega$  convenant donc à l'attaque du filtre.

Un potentiomètre permet de doser la fraction convenable du signal de sortie pour être appliquée au mélangeur.

### 3°) Les filtres passe-bande et leurs circuits associés (fig. 12)

Comme nous l'avons déjà dit, nous utilisons deux circuits bouchons en série. Les bobinages sont réalisés sur pot fermé en ferrite.

Les deux circuits sont attaqués, à travers une résistance de  $47\text{ K}\Omega$  qui contribue à leur amortissement, par un amplificateur à charge de cathode.

Un potentiomètre de  $250\text{ K}\Omega$  transmet une fraction du signal issu des filtres à un amplificateur de tension utilisant l'une des triodes d'un tube ECC 82.

La deuxième triode est montée à charge de cathode pour attaquer à basse impédance le détecteur d'enveloppe.

### 4°) Le détecteur d'enveloppe (fig. 13)

Comme sa dénomination l'indique, ce circuit doit détecter l'enveloppe du signal issu du filtre passe bandes, et ceci avec une constante de temps correcte, la plus courte possible.

De plus, les essais montrent que l'action doit être très franche sur le modulateur. Ceci peut être réalisé en donnant au détecteur un seuil d'action réglable et en limitant l'action maximale grâce à un circuit écrêteur.

La tension issue du détecteur sert de tension de polarisation pour la grille d'une triode ECC83 constituant le modulateur.

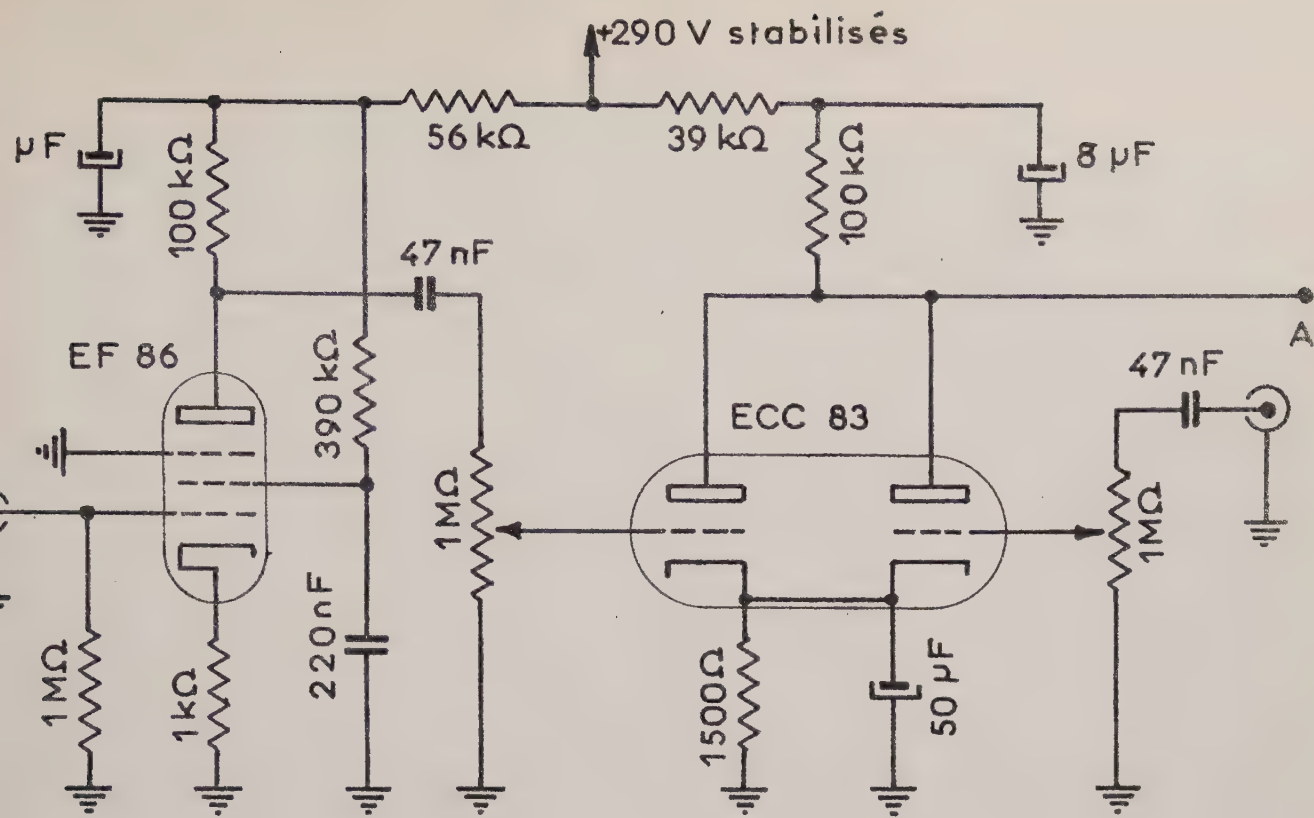


Fig. - 9 - LE PRÉAMPLIFICATEUR

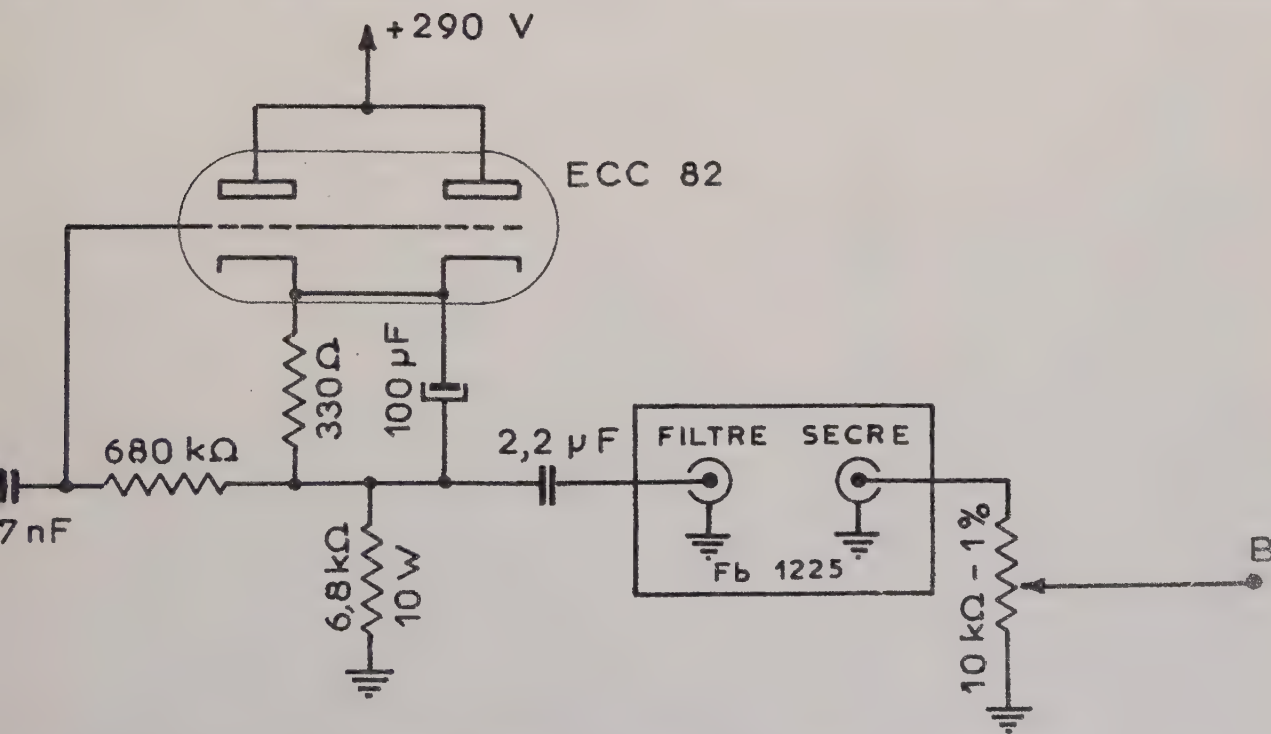


Fig. - 10 - LE FILTRE PASSE-BAS ET SON CIRCUIT D'ATTAQUE



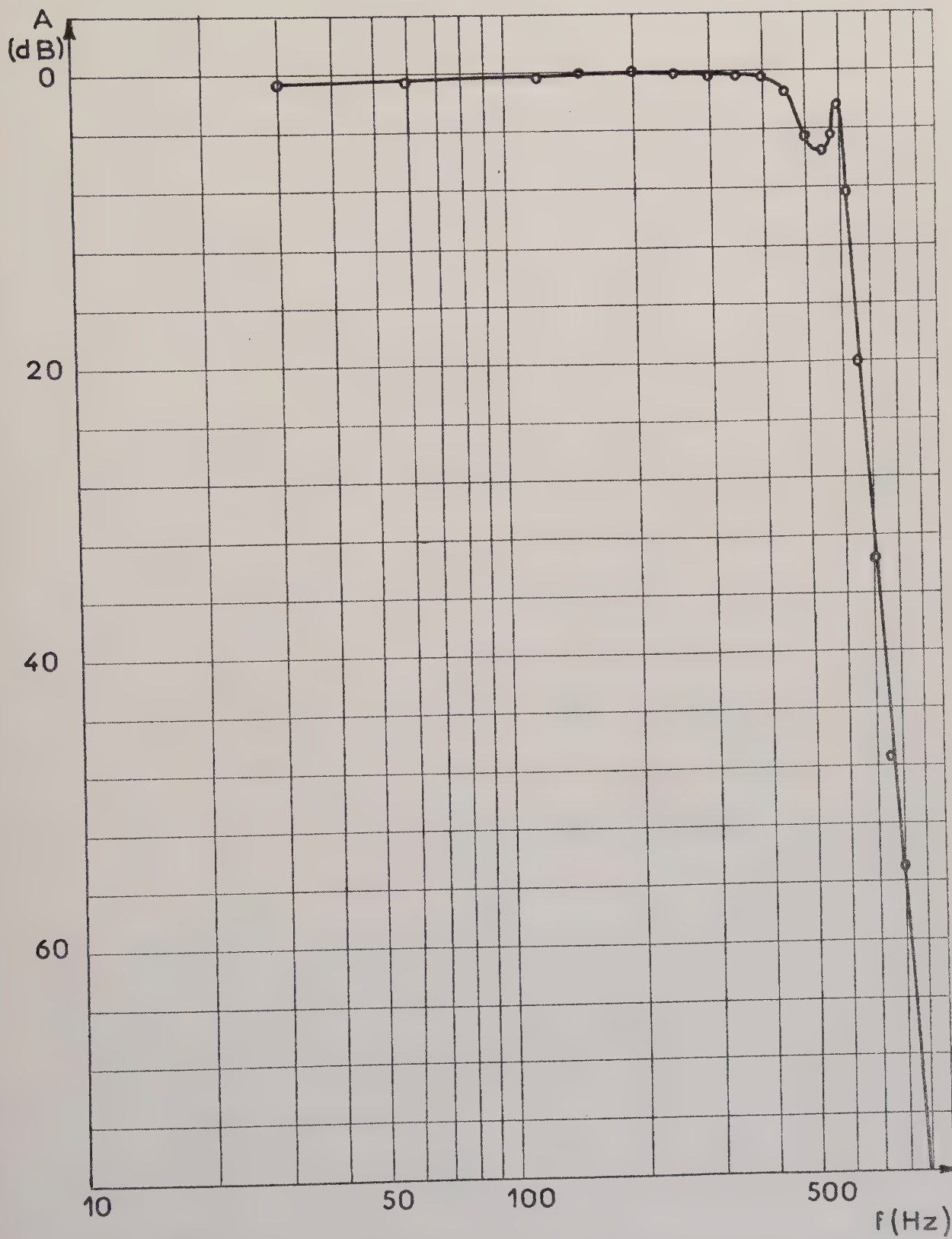


Fig.-11 - COURBE DE REPONSE DU FILTRE



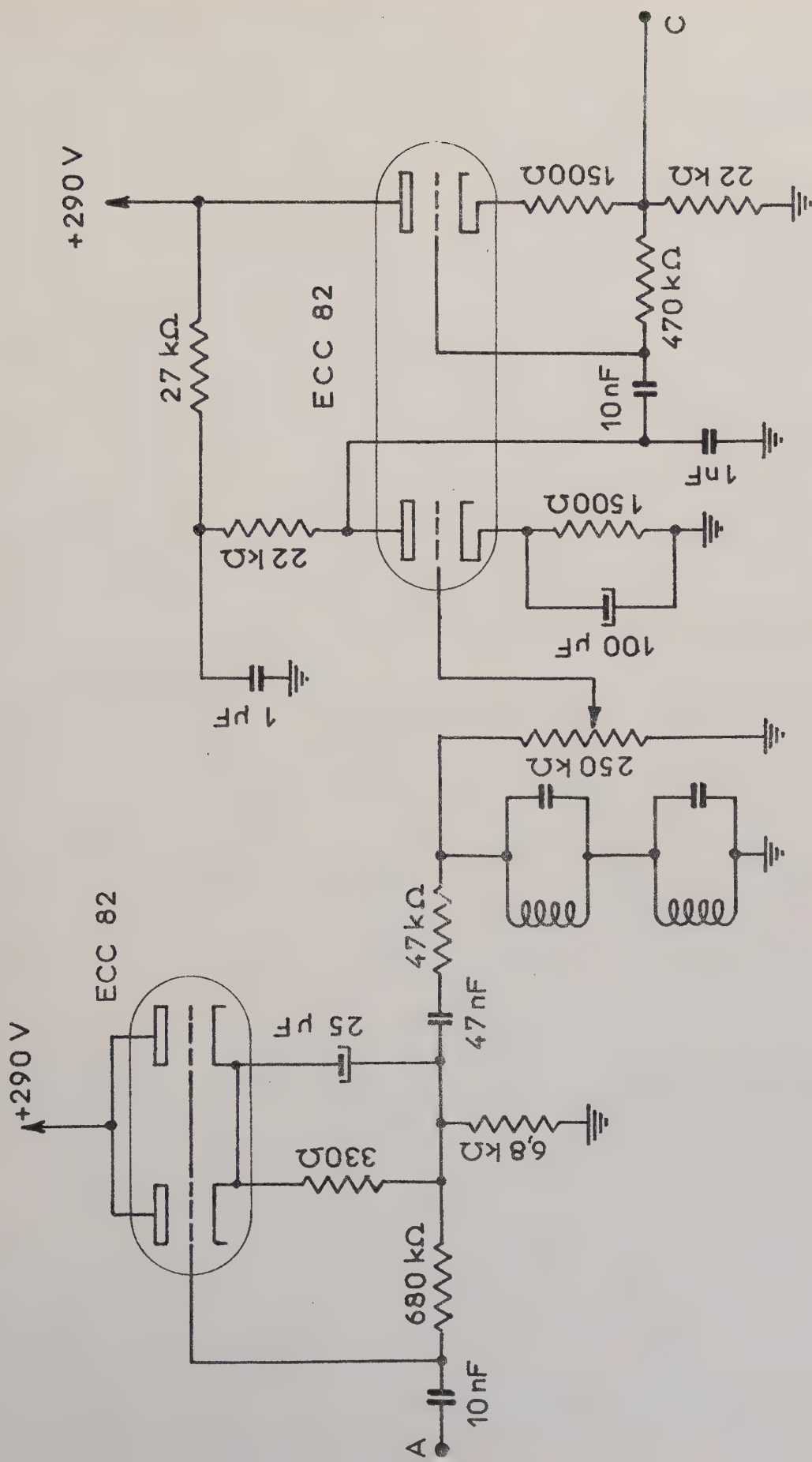


Fig.~12 - LE FILTRE PASSE-BANDES ET LES CIRCUITS ASSOCIES



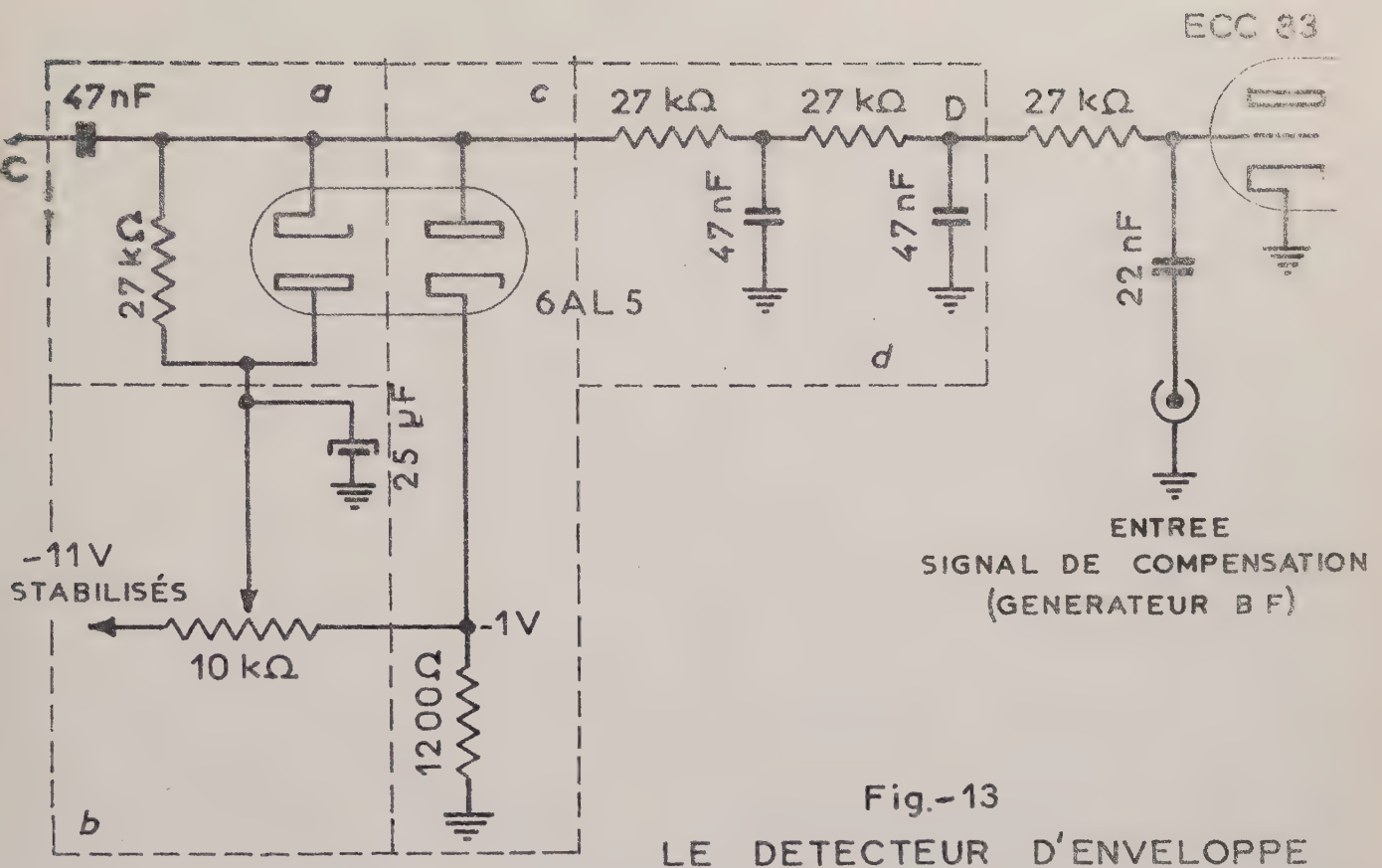


Fig.-13  
LE DETECTEUR D'ENVELOPPE

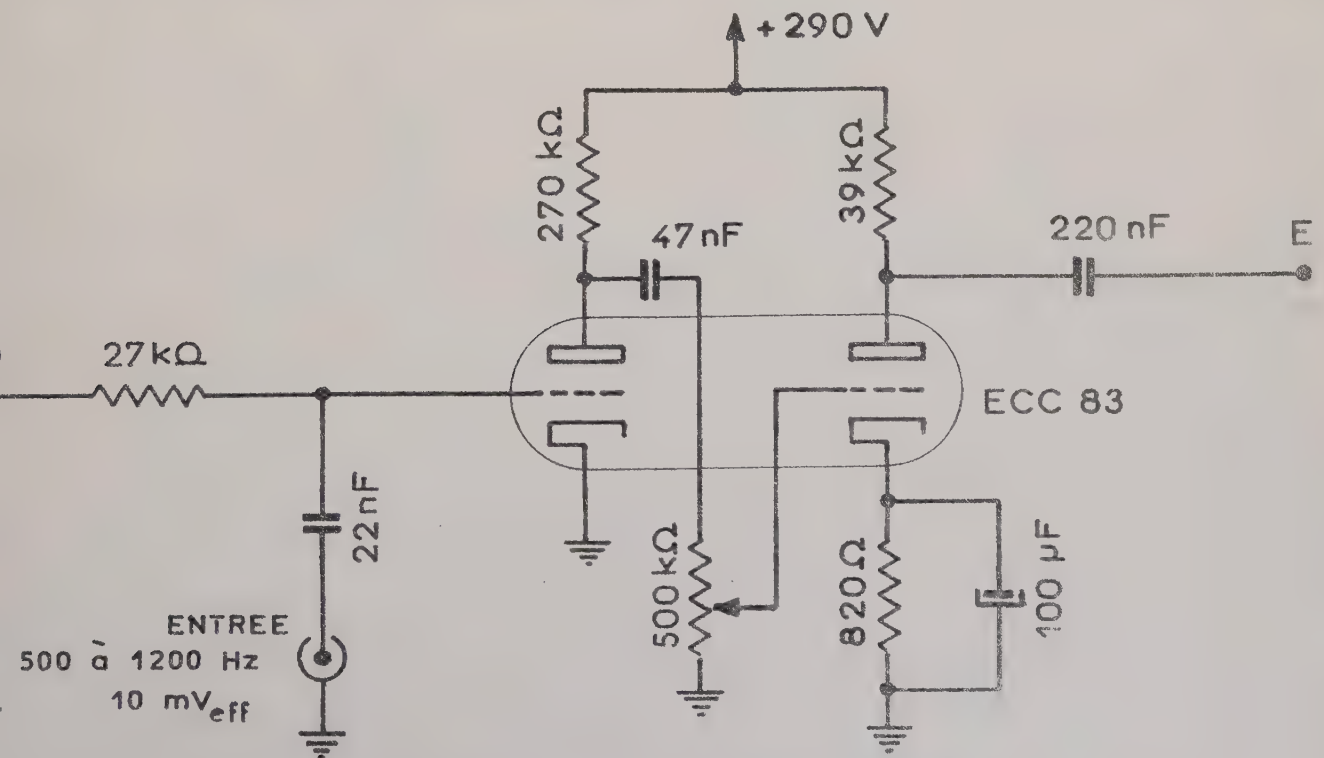


Fig.-14 LE MODULATEUR



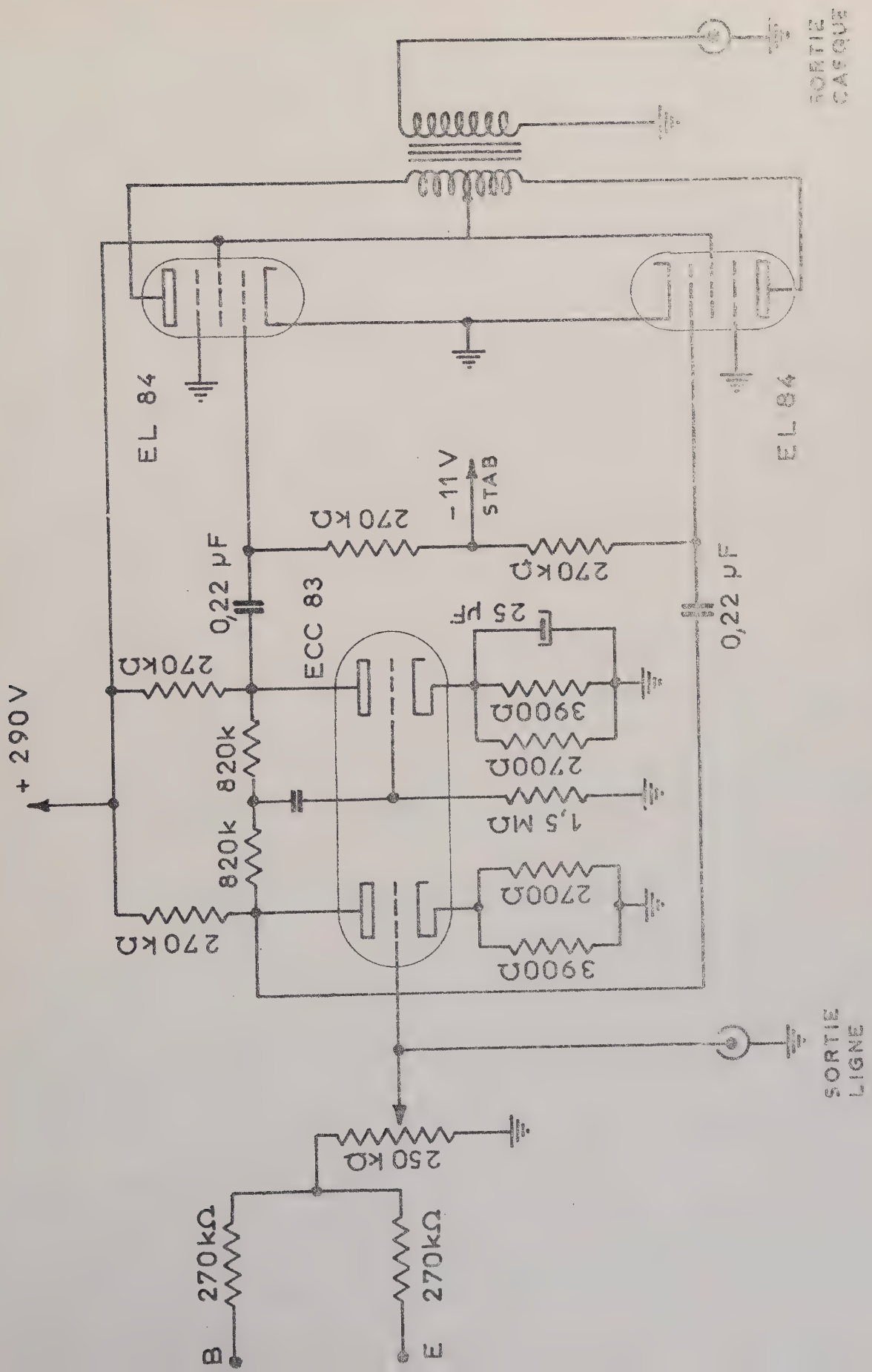


Fig. 15 - MELANGE ET AMPLIFICATION



Le seuil d'action est obtenu en bloquant le tube modulateur avec un recul de grille réglable par rapport à la tension de cut-off.

Le circuit comprend :

- a) un détecteur série utilisant l'une des diodes d'un tube 6AL5
- b) un circuit fournissant la tension continue de référence du détecteur, et permettant donc de bloquer plus ou moins le tube modulateur en l'absence de tension alternative à l'entrée du détecteur.
- c) un circuit écrêteur, utilisant l'autre diode du tube 6AL5, limitant la tension de polarisation du tube ECC83 à - 1V.
- d) un filtre passe-bas déterminant la constante de temps de détection. Dans cet appareil, la constante de temps retenue est de 3 ms., c'est-à-dire trois fois plus longue que la constante de temps du filtre passe-bandes.

#### 5°) Le modulateur (fig. 14)

Il utilise les deux triodes d'un tube ECC83.

Une première triode, polarisée par le détecteur d'enveloppe, reçoit le signal de compensation issu d'un générateur B.F. Un potentiomètre permet de doser le signal obtenu sur la charge d'anode et de l'appliquer à un deuxième étage d'amplification constitué par la deuxième triode du tube ECC83.

#### 6°) Le mélangeur et l'amplificateur de sortie (fig. 15)

Les signaux issus du filtre passe-bas et du modulateur sont mélangés par trois résistances. Le produit du mélange est délivré d'une part à la sortie ligne (utilisation d'un amplificateur extérieur ou d'un analyseur) et d'autre part à l'amplificateur de puissance de sortie de schéma classique, utilisant un déphaseur paraphase et un push-pull de deux tubes EL84 à polarisation fixe.

L'ensemble est alimenté depuis le secteur alternatif par une alimentation délivrant :

- la tension de chauffage des tubes 6,3 Veff. 50 Hz
- la haute tension de 290 V stabilisée par tube ballast EL34
- la tension de polarisation de - 11 V continu, stabilisée par une diode Zener.

## E - COMPENSATION DOUBLE

Notre deuxième appareil décrit ci-dessus est depuis trois ans à la disposition d'un centre de rééducation de la région parisienne.

Nous décrirons les résultats obtenus au chapitre V.

Nous avons depuis réalisé un troisième appareil se distinguant du précédent par les différences suivantes :

- transistorisation intégrale
- utilisation d'une compensation double.

La transistorisation est un premier pas vers la conception d'un appareil suffisamment miniaturisé pour être utilisé comme prothèse portative.

La compensation double est un perfectionnement au principe du deuxième appareil : il nous a en effet paru utile de réaliser une meilleure différenciation dans les renseignements fournis par le son de compensation.

Pour obtenir cette différenciation, la méthode utilisée consiste à synthétiser deux sons de compensation au lieu d'un seul.

Ces sons de compensation sont de fréquence différente pour qu'ils soient distingués l'un de l'autre. Ils sont "déclenchés" respectivement par deux filtres passe-bande accordés sur les fréquences de 2700 Hz et 6000 Hz utilisées dans notre deuxième appareil.

Il convient ici de bien faire la différence entre la fréquence d'un son de compensation qui doit être perceptible au sourd profond, donc inférieure à 1000 Hz par exemple, et la fréquence de résonance du circuit accordé (2700 Hz ou 6000 Hz) qui sert à déceler la présence de composantes fréquentielles aiguës, donc non perçues.

Par conséquent, lorsque le sourd entend le son de compensation n° 1 (supposons 500 Hz), c'est que le microphone a reçu un son comportant des composantes d'intensité suffisante dans la bande du premier circuit accordé, centrée sur 2700 Hz.

De même, si le sourd entend le son de compensation n° 2 (supposons 700 Hz), c'est que le microphone a reçu un son comportant des composantes d'intensité suffisante dans la bande passante du deuxième circuit accordé, centrée sur 6000 Hz.

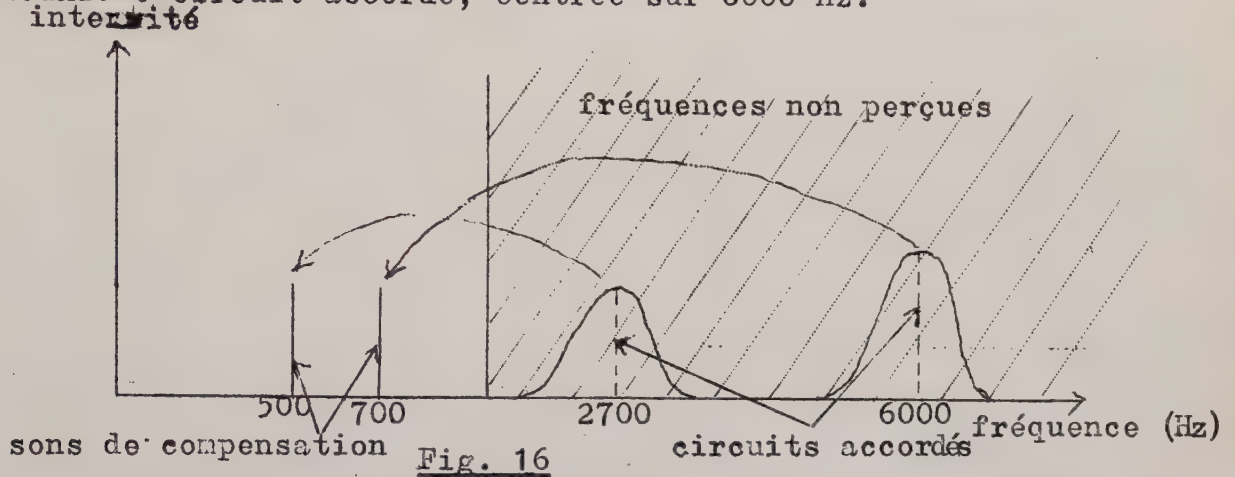


Fig. 16

Le schéma symbolique figure 16 illustre notre explication.

Le schéma figure 17 illustre le premier principe (son de compensation unique).

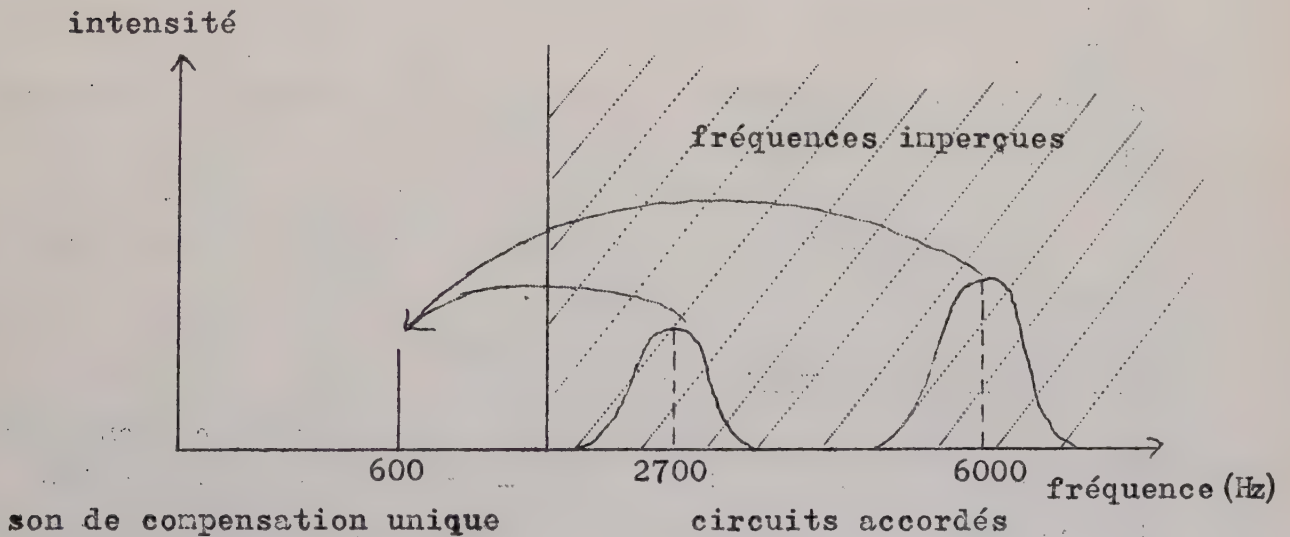


Fig. 17

## F - DESCRIPTION DU TROISIEME APPAREIL REALISE (6) (7)

Le schéma synoptique général de l'appareil transistorisé à double compensation est représenté figure 18.

On y distingue :

- a) le préamplificateur
- b) le filtre passe-bas avec des commutations
- c) les deux voies de compensation
- d) l'amplificateur final
- e) deux alimentations

### a) le préamplificateur

Il comporte trois entrées de différentes sensibilités. Ces entrées sont commutables par un bloc à touches. Le circuit d'entrée le plus sensible, d'impédance  $600\Omega$  environ, comporte un étage d'amplification équipé d'un transistor à faible bruit 2N508.

La sortie de ce premier étage ou les deux autres entrées attaquent un étage adaptateur d'impédance monté en "bootstrap" (2N525), suivi d'un étage d'amplification de gain 500 environ (2N525).

Le dernier étage du préamplificateur est un adaptateur d'impédance équipé de deux transistors complémentaires.

L'impédance de sortie est de quelques ohms.

Un "vu-mètre" est couplé à la sortie du préamplificateur. Il sert à en éviter la saturation.

### b) Le filtre passe-bas

Comme cet appareil fournit deux sons de compensation, nous avons utilisé un filtre passe-bas à bande plus étroite : la fréquence de coupure est de 500 Hz au lieu de 800 Hz sur l'appareil précédent.

Le filtre est équipé de deux cellules en  $\pi$ . Les bobines sont réalisés sur pot fermé en ferrite B.F.

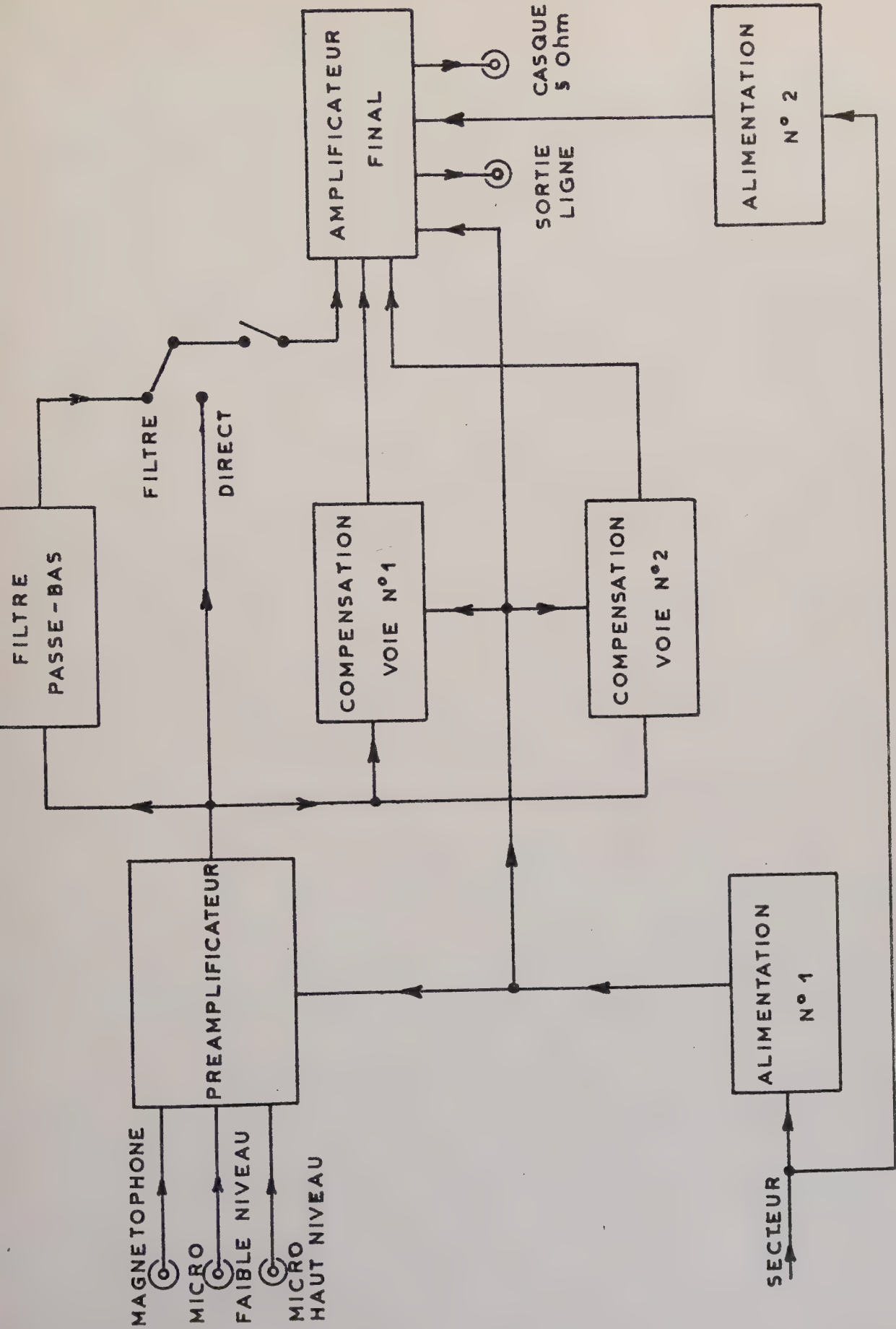


FIG. 18 - SCHEMA SYNOPTIQUE GENERAL



Un potentiomètre ajustable permet de fermer le filtre sur l'impédance d'adaptation correcte. Comme cet appareil est expérimental, nous avons jugé qu'il est démonstratif de pouvoir mettre /<sup>en</sup> hors/ circuit le filtre passe-bas.

C'est pourquoi deux interrupteurs permettent, le premier de transmettre à l'amplificateur final le signal initial soit filtré, soit non filtré, le deuxième de couper totalement cette voie, afin que l'amplificateur final ne reçoive que les sons de compensation.

### c) Les deux voies de compensation

Elles sont toutes deux rigoureusement identiques, excepté la fréquence de résonance et le coefficient de surtension des circuits bouchons.

Le schéma synoptique d'une voie de compensation est indiqué figure 19.

On y distingue :

- 1°) un amplificateur accordé (circuit bouchon)
- 2°) un circuit de détection d'enveloppe
- 3°) un oscillateur B.F. (son de compensation)
- 4°) un amplificateur à gain commandé (modulateur)

#### 1°) L'amplificateur accordé (fig. 20)

Un potentiomètre permet de doser le signal fourni à un transistor 2N525 chargé par le circuit bouchon.

Une prise sur le bobinage permet d'adapter l'impédance avec l'étage d'amplification suivant, équipé lui aussi d'un transistor 2N525.

#### 2°) Le circuit de détection (fig. 21)

Une diode OA85 est montée en détecteur série. Le potentiel de référence est fourni par une chaîne de résistance comportant le potentiomètre de réglage du seuil.

Un filtre passe-bas à trois cellules R.C. complète la détection.

### 3°) L'oscillateur B.F. (fig. 22)

Il est du type à "pont de Wien". Il est équipé d'un transistor pnp 2N525 et d'un transistor npn 2N 1304 couplés par une liaison directe.

Un potentiomètre double de  $10\text{ K}\Omega$  permet d'ajuster la fréquence entre 500 et 1000 Hz environ.

Une thermistance sous ampoule de verre permet de stabiliser l'amplitude des oscillations.

Enfin, un potentiomètre de  $500\Omega$  ajustable permet de donner le signal envoyé au modulateur.

### 4°) Le modulateur (fig. 23)

Un transistor 2N525 monté en collecteur commun reçoit sur sa base le signal issu de l'oscillateur B.F.

Un deuxième transistor 2N525 a son émetteur réuni à l'émetteur du premier transistor.

Il est normalement bloqué par suite de la liaison de la base avec le détecteur d'enveloppe.

Lorsque le détecteur reçoit un signal alternatif de niveau suffisant, il débloquent plus ou moins le transistor qui transmet par conséquent le signal présent sur son émetteur à sa charge de collecteur.

Un potentiomètre de  $2500\Omega$  permet de régler le niveau de son de compensation dirigé vers l'amplificateur final.

### d) L'amplificateur final (fig. 24)

Il comporte un premier transistor qui mélange sur sa base les signaux provenant de chaque voie de compensation.

Un deuxième transistor mélange le signal ainsi obtenu avec le signal issu du filtre passe-bas. Il est suivi d'un transistor monté en collecteur commun et dont la sortie est disponible.

Un potentiomètre permet de doser la puissance finale. Son curseur est réuni à la base d'un transistor amplificateur de tension lui-même couplé en liaison directe avec l'amplificateur final du type push-pull série, équipé d'un transistor npn 2N 1304, de deux transistors "drivers" SFT 233 et de deux transistors de puissance "2N 174".

Un condensateur de 3000  $\mu$ F permet la liaison avec la "sortie casque", d'impédance nominale  $5\Omega$ .

#### e) Les alimentations stabilisées

L'appareil comporte deux alimentations stabilisées distinctes, toutes deux du type à ballast série.

L'une d'elle alimente exclusivement l'amplificateur de puissance par une tension de - 15 V.

La deuxième alimente le reste de l'appareil par une tension de - 13,5 V.



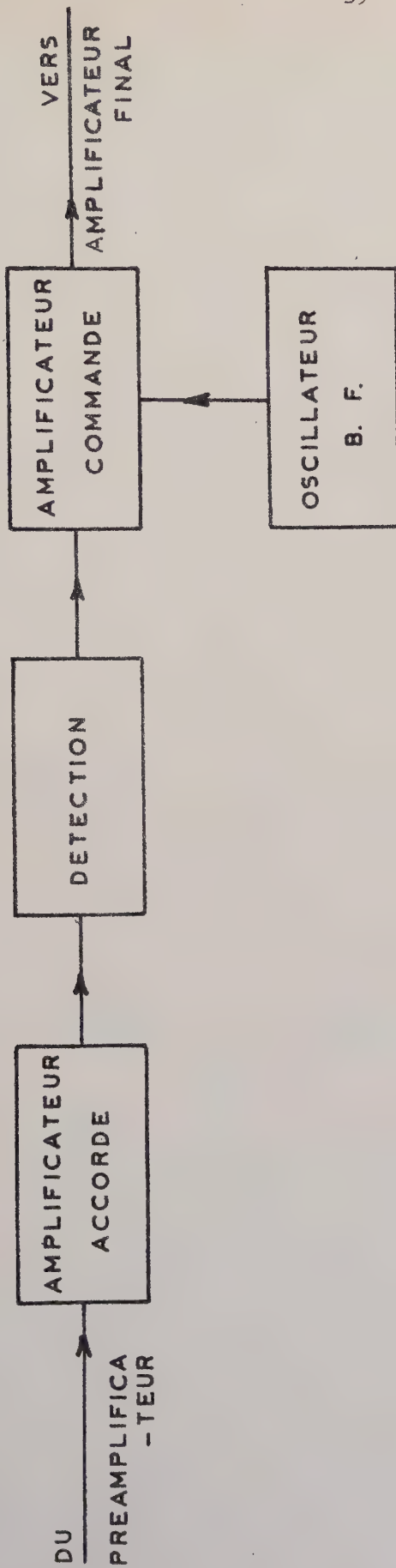


FIG.-19 - SCHEMA SYNOPTIQUE D'UNE VOIE DE COMPENSATION  
(Les schémas de chaque voie sont identiques)



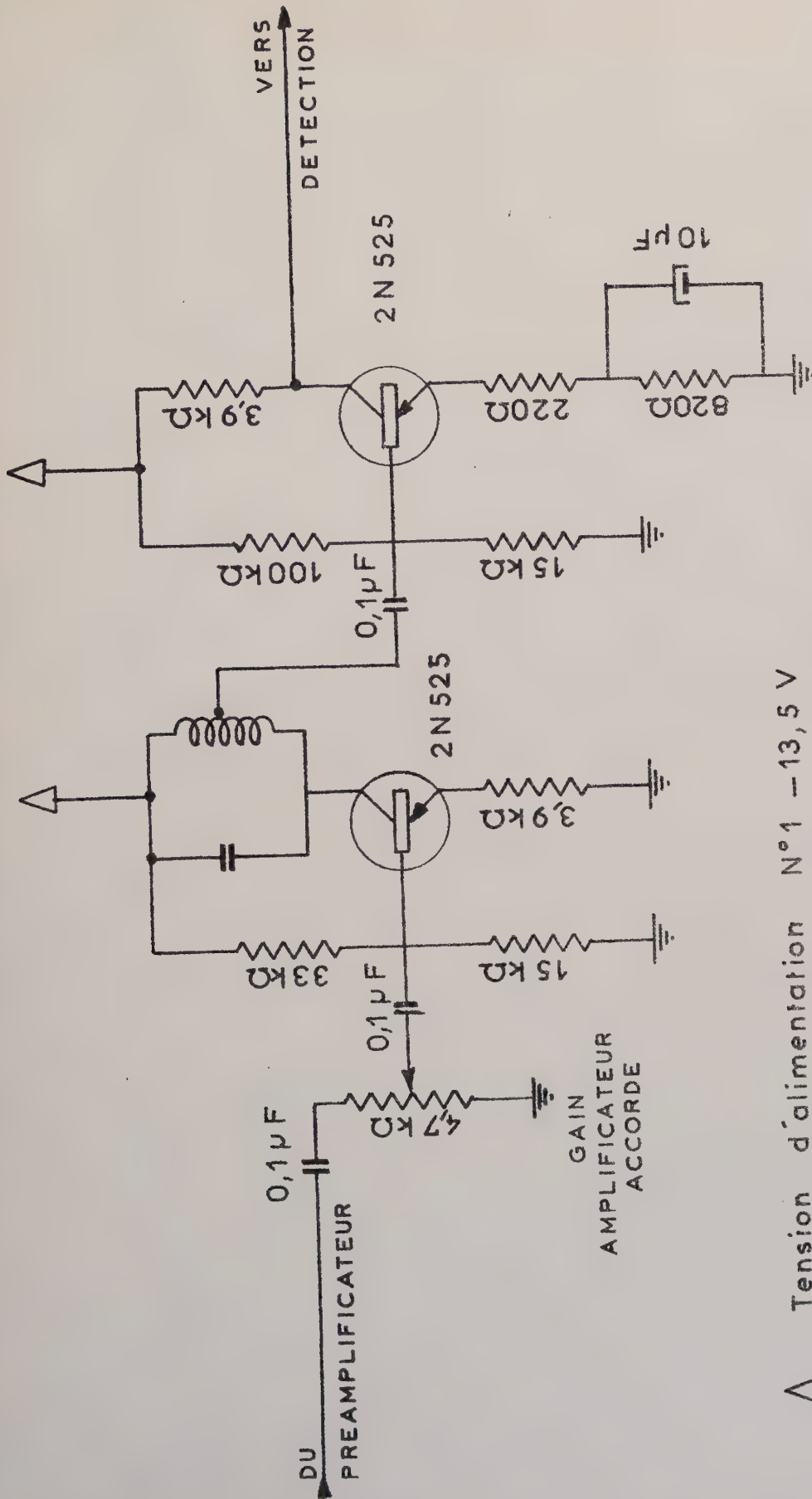
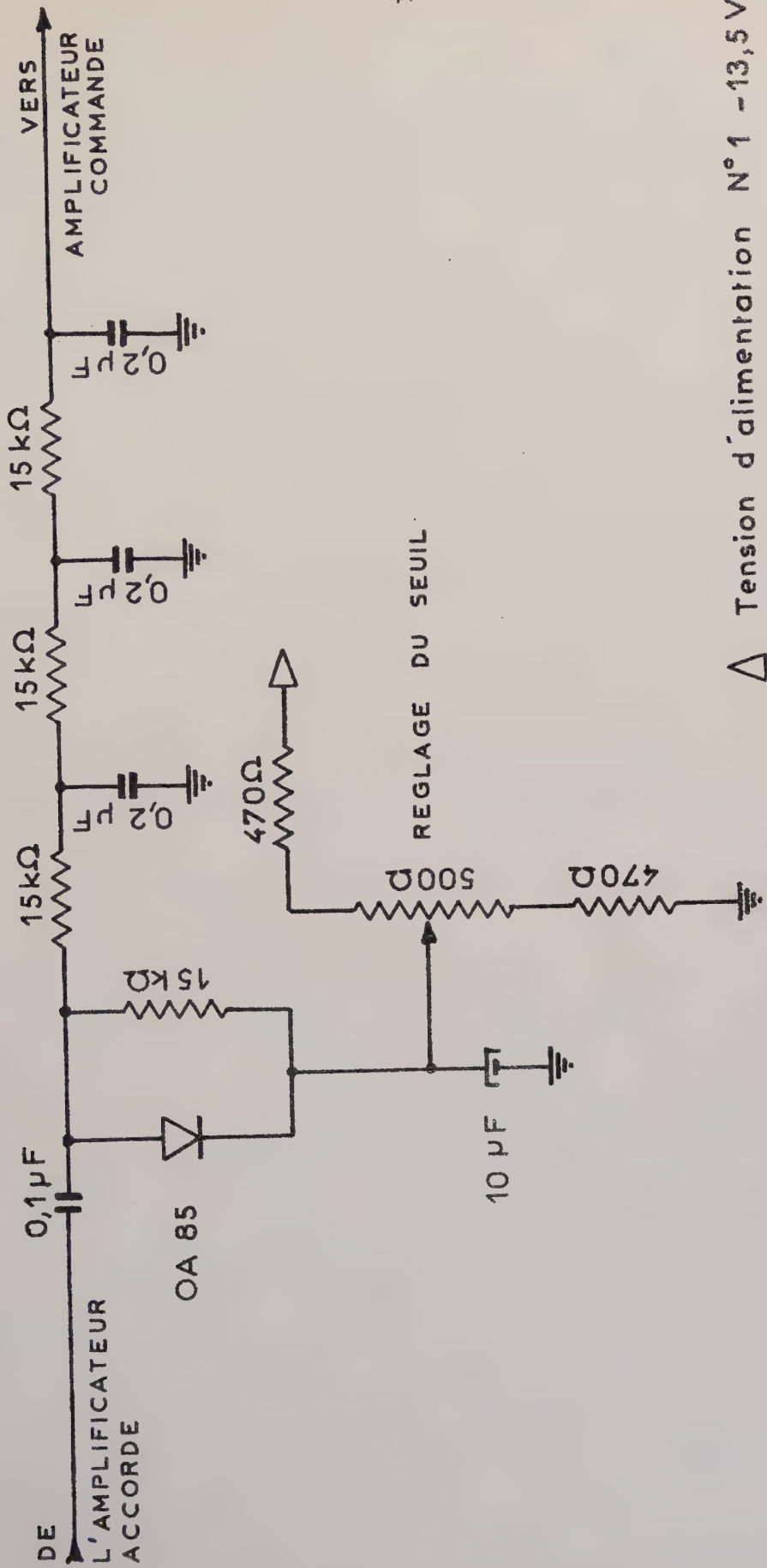


FIG.-20 - SCHEMA D'UN AMPLIFICATEUR ACCORDE

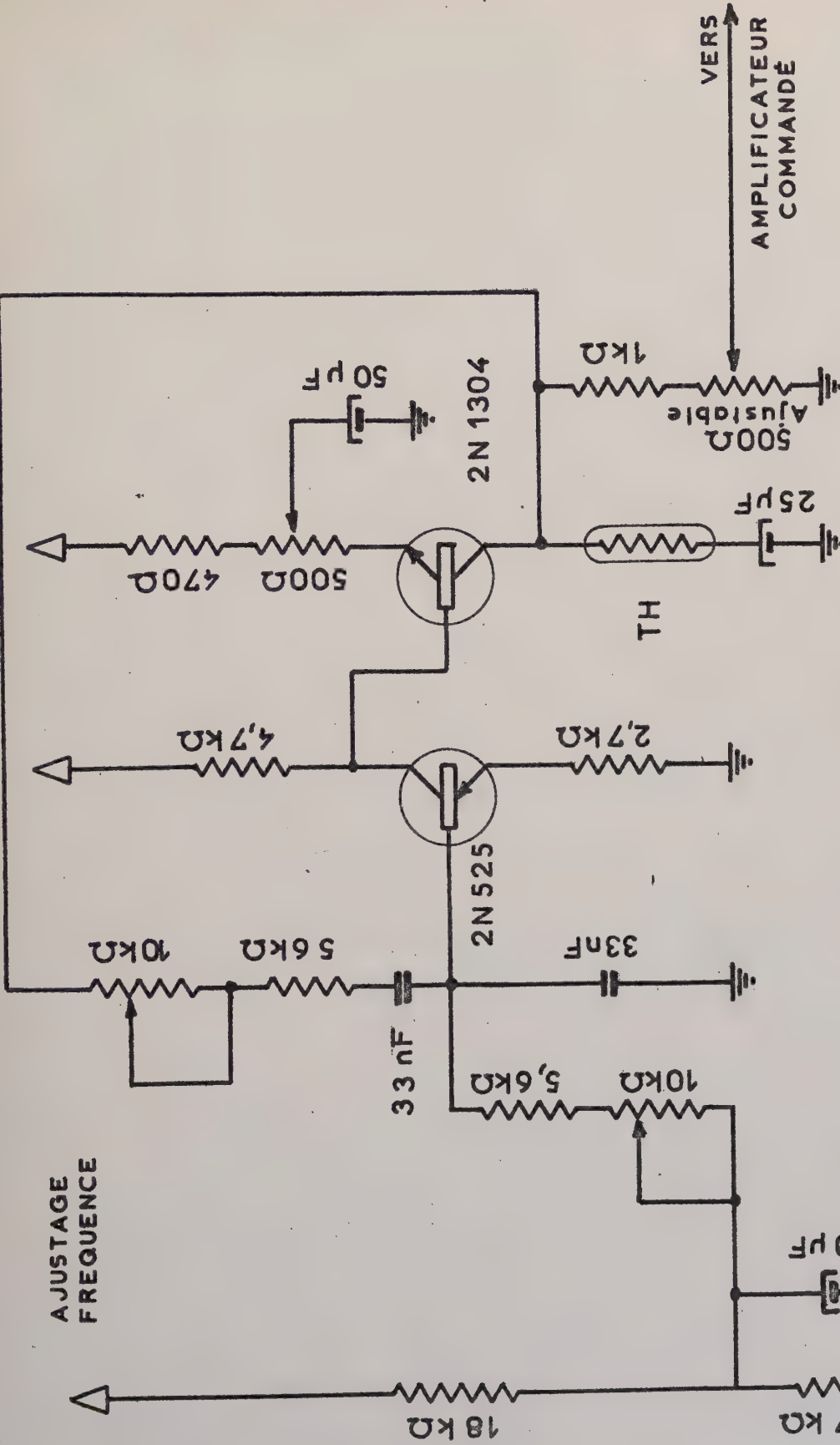




$\Delta$  Tension d'alimentation N°1 -13,5V

FIG-21 - SCHEMA D'UN DETECTEUR

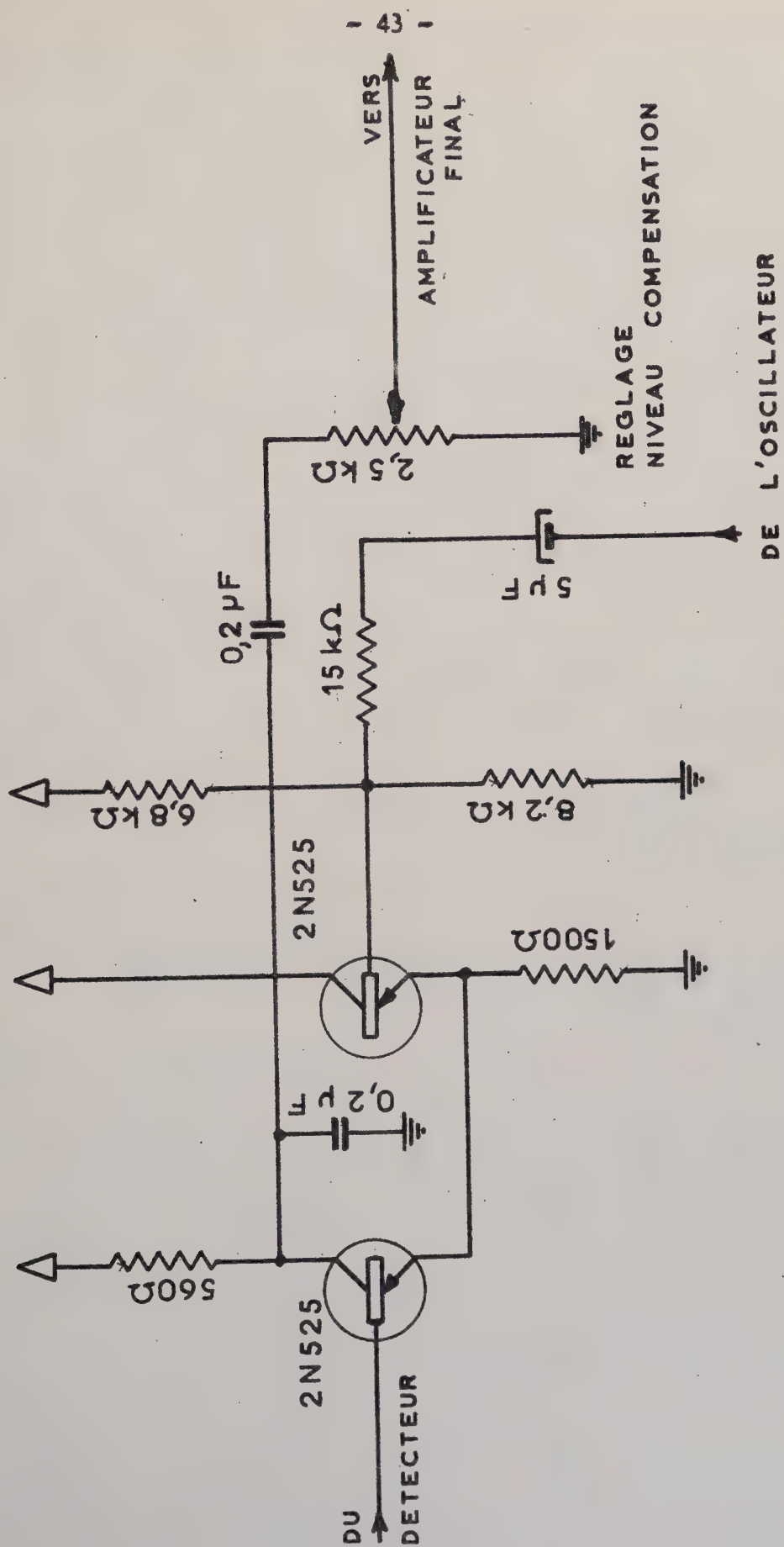




Δ Tension d'alimentation N°1 -13,5 V  
 TH: Thermistance sous vide 1kΩ à 25°C

FIG-22 - SCHEMA D'UN OSCILLATEUR





△ Tension d'alimentation N°1  $-13,5\text{ V}$

FIG.-23 - SCHEMA D'UN AMPLIFICATEUR COMMANDE







## CHAPITRE V

### RÉSULTATS

#### A - APPAREIL A COMPENSATION SIMPLE : MISE EN OEUVRE ET UTILISATION

Notre appareil à "son de compensation unique" se trouve depuis trois ans à la disposition de l'Institut Gustave BAGUER d'ASNIERES (Seine).

Nous devons à la compétence, à la patience et au dévouement de Madame H. MERVANT, qui utilise notre appareil, l'essentiel des résultats cliniques obtenus à ce jour.

Examinons tout d'abord le mode d'emploi de cet appareil.

#### I - Mise en oeuvre

Après mise sous tension successive des circuits de chauffage des filaments et de la haute tension, on procède de la façon suivante :

##### a) choix de la fréquence du son de compensation

Suivant la limite du champ auditif perçu par le sujet, on choisit la fréquence du signal de compensation délivré par le générateur basse fréquence.

"On peut donc faire entendre à chaque enfant le signal de compensation dans sa zone d'audition. Mais, pour que les graves ne soient pas masqués, ce signal est émis à la limite de l'audition du sujet, plutôt en deçà, de façon à être sûr qu'il soit bien perçu". (8).

##### b) Réglage du seuil de déclenchement

On annule tout signal microphonique (potentiomètre d'entrée au minimum) et on règle le potentiomètre de seuil soit à la limite de la perception du son de compensation par le sujet, soit au-dessous de cette limite, suivant le résultat recherché.

c) Réglage du gain du préamplificateur

On règle le gain du préamplificateur (potentiomètre d'entrée) en fonction de la sensibilité du microphone pour se trouver légèrement au-dessous de la limite de la saturation des étages d'entrée.

d) Réglage du gain de l'amplificateur accordé

Ce gain est réglé empiriquement en fonction du nombre plus ou moins élevé de phonèmes que l'on désire "compenser".

II - Utilisation

Madame MERVANT précise que :

"L'appareil ne peut se substituer à tout. Il est d'un apport extraordinaire dans l'éducation de l'enfant sourd puisqu'il lui donne une sensation supplémentaire d'importance, mais il s'ajoute à ce que nous avons déjà : lecture labiale, articulation, mot écrit, etc... L'appareil est une addition et non pas une substitution" (8).

B - RESULTATS OBTENUS

Les enfants dont s'est occupé Madame MERVANT, tous atteints de surdité profonde, sont âgés de trois à sept ans. Tous ceux qui ont été rééduqués avec l'aide de notre appareil en ont tiré profit :

"Premier résultat important : pas d'enfant qui n'ait de sensation auditive avec cet appareil. Jusqu'alors pas d'échec" (8).

La rééducation demande dans tous les cas de la patience, mais avec notre appareil, elle est toujours accélérée. De plus :

"Les voix obtenues sont en général de bonne qualité, bien timbrées, assez hautes, jamais trop graves" (8).

Tous les phonèmes peuvent être distingués les uns des autres, sauf i et u.

De toutes les consonnes, les spirantes sont les plus rapidement acquises :

"Un succès spectaculaire et total est obtenu dans les phrases comportant des f s ch v z j"

"Le signal de compensation variant dans son intensité, plus l'élément est fermé, plus le signal est faible :

f : signal très faible

s : signal plus intense

ch : signal nettement plus fort

De même pour v z j.

Un petit inconvénient à l'apprentissage, l'enfant entendant le signal a tendance à sonoriser f s ch, mais le contrôle du toucher lui fait constater l'absence de vibrations et il comprend facilement que c'est son souffle qui déclenche le signal et que la qualité du souffle est liée à l'intensité produite". (3).

Pour les autres phonèmes, les progrès, s'ils sont moins rapides et spectaculaires, n'en sont pas moins réels.

"Les consonnes : p t k

b d g

m n gn

se distinguent bien, par séries.

On les associe avec les voyelles et même au départ on redouble la syllabe.

A ce moment, il n'y a pas de confusion entre :

papa baba mama etc...

L'explosion pour : p t k est nette.

Pas de nasalisation précédant la vibration dans b d g (mb md).

Mais, par contre, bonne nasalisation de m n gn, sans nasalisation de la voyelle associée (mi jamais min)" (8).

En conclusion de son exposé, Madame MERVANT affirme :

"Une fois que l'enfant sait se servir de l'appareil, sa pratique associée à la lecture labiale, donne d'excellents résultats et l'expérience faite avec un certain nombre d'appareils nous permet de parler de résultats supérieurs à ceux obtenus avec des appareils sans signal de compensation. Ce signal, entendu dans

les fréquences convenant à l'enfant, enrichit ses possibilités de reconnaissance du message sonore et lui permet des contrôles plus nombreux et plus précis en ce qui concerne ses propres émissions, donc plus d'action sur sa propre voix.

Le codage est très simple et nécessite très peu d'explications, puisqu'il est possible d'utiliser cet appareil avec des enfants de trois à quatre ans.

La supériorité de cet appareil tient simplement à sa richesse d'informations très facilement interprétables" (8).

## C - APPAREIL A DOUBLE COMPENSATION : MISE EN OEUVRE ET UTILISATION

Notre appareil transistorisé à double compensation n'a pas encore été utilisé pour la rééducation orthophonique. Nous en espérons cependant de meilleurs résultats qu'avec l'appareil à simple compensation pour les raisons suivantes :

- le fait qu'il existe deux sons de compensation représentatifs de deux zones formantiques augmente incontestablement la quantité d'informations.

- malgré l'augmentation de sa complexité, nous espérons que le codage n'en sera pas moins accessible à de jeunes enfants.

- enfin, nous avons particulièrement soigné dans cet appareil la rapidité du temps de réponse des sons de compensation, au bénéfice certain d'une meilleure acquisition des consonnes brèves, et en particulier des explosives.

### I - Mise en oeuvre

Dès la mise sous tension, l'appareil est prêt à être utilisé, ceci étant dû à sa transistorisation intégrale.

On procède ensuite comme avec l'appareil à simple compensation, à la seule différence près qu'il convient de régler séparément chacune des deux voies de compensation.

Le réglage de gain du préamplificateur est facilité par la présence d'un VU-METRE incorporé. Le choix des fréquences des

sons de compensation est plus délicat car il convient de loger ces deux fréquences entre la limite supérieure du fondamental laryngé (450 à 500 Hz) et la limite supérieure du ~~champ~~ auditif du sujet (souvent 800 Hz et parfois moins).

De plus, il convient que les notes musicales des deux sons de compensation soient le plus dissonantes possible pour en faciliter la différenciation.

Il est probable que l'expérimentation réelle de l'appareil en rééducation permettra de préciser ce point important.

## II - Utilisation

L'appareil n'a pas encore été utilisé.

Nous pouvons supposer que la méthode déjà employée avec notre premier appareil par Madame H. MERVANT restera valable moyennant quelques modifications dues à la présence de deux sons de compensation au lieu d'un seul.

## D - APPAREIL A DOUBLE COMPENSATION : RESULTAT DES ANALYSES

En attendant l'utilisation en rééducation, nous avons étudié les possibilités de notre appareil à l'aide d'un analyseur de spectre "SONAGRAPH".

Les performances obtenues laissent espérer de meilleurs résultats en rééducation, non seulement par suite de la présence de deux sons de compensation, mais aussi à cause du fait que le temps de réponse est particulièrement bref : il en résulte que les sons de compensation sont modulés en amplitude au rythme du fondamental laryngé : en conséquence, le spectre d'un son de compensation comprend, lors d'une voyelle, non seulement la "porteuse", c'est-à-dire la fréquence de l'oscillateur sinusoïdal, mais aussi des raies latérales écartées de cette porteuse d'un multiple de la fréquence du fondamental laryngé.

Dans le cas d'une spirante, on obtient des bandes latérales dues aux variations aléatoires rapides de l'intensité du phonème.

Ces raies ou bandes latérales enrichissent considérablement la quantité d'information portée par les sons de compensation.

Nous présentons hors texte la reproduction de cinq des "SONAGRAMMES" que nous avons obtenus lors de nos analyses.

Sur ces diagrammes, le temps se trouve en abscisse (2,4 secondes pour les trois premiers, 0,8 secondes pour les deux autres).

La fréquence est en ordonnée (0 à 3000 Hz pour les trois premiers, 0 à 1000 Hz pour les deux autres).

Le degré de noircissement de la feuille représente l'amplitude.

Le premier diagramme est l'analyse de la phrase "GANSE COUSUE MAIN" transmise intégralement à l'analyseur.

On remarquera le fondamental et ses nombreux harmoniques lors des voyelles ainsi que le "s" de GANSE, au caractère aléatoire avec la plus grande partie de l'énergie au-dessus de 4000 Hz.

Le deuxième diagramme représente la même phrase transmise à travers le filtre passe-bas de notre appareil. Remarquons que le "s" a pratiquement disparu.

Le troisième diagramme représente le signal complet issu de notre appareil, toujours pour la même phrase.

Remarquons l'apparition des sons de compensation qui se distinguent par leur fréquence rigoureusement constante.

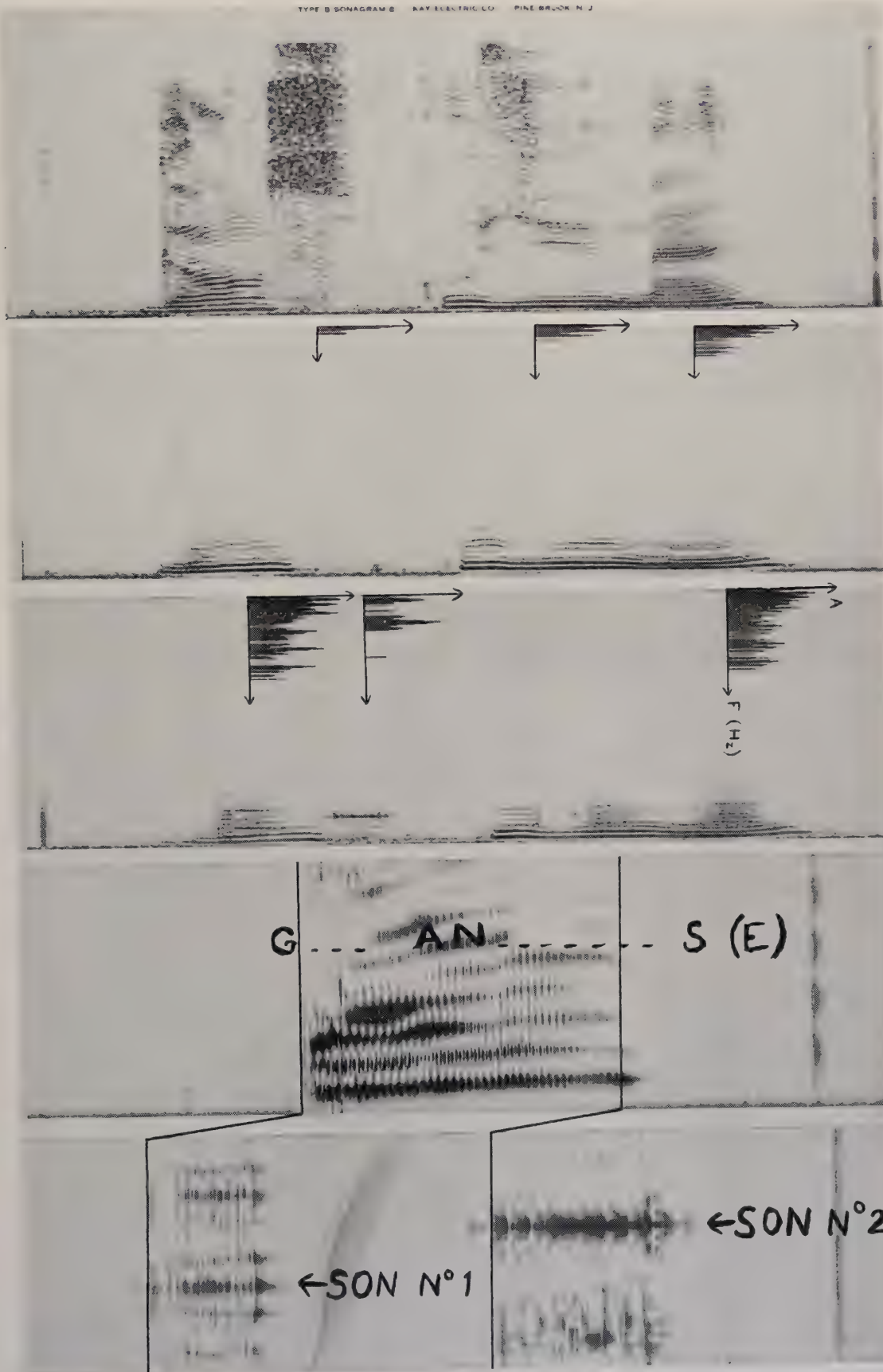
Sur le deuxième et le troisième diagramme, se trouvent aussi des "coupes" instantanées qui sont des spectres de FOURIER ordinaires. On constate l'augmentation considérable de l'information par les sons de compensation.

Le quatrième diagramme, enregistré sans compensation représente le seul mot "GANSE" dont on ne voit pratiquement que le "AN".

Le cinquième diagramme représente les sons de compensation correspondant au même mot "GANSE".

Le son de compensation n° 1 est présent lors du début de la voyelle "AN".

Le son de compensation n° 2 est présent pendant toute la durée du "S".





## CONCLUSION

Dans notre exposé, nous avons tout d'abord examiné le difficile problème de l'éducation de la parole de l'enfant atteint de surdité profonde.

Nous avons ensuite constaté quels sont les restes auditifs qu'il est possible d'exploiter dans la majorité des cas.

Puis nous avons décrit les appareils que nous avons construit pour matérialiser les idées du Dr. J.C. LAFON, afin de transposer dans la zone grave perçue des informations sur la zone aiguë, porteuse de la plus grande partie du message sonore de la parole.

Enfin, nous avons exposé les résultats très encourageants déjà obtenus avec l'un de nos appareils ainsi que les perfectionnements que nous avons apportés à ce prototype en construisant un nouvel appareil, entièrement transistorisé, et aux possibilités étendues.

Dans un avenir proche, un constructeur industriel doit fabriquer en petite série notre dernier appareil, ce qui permettra aux nombreux instituts spécialisés dans la rééducation orthophonique d'exploiter à leur tour les nouvelles possibilités qui leur sont offertes.

Il est aussi permis d'espérer que les progrès récents dans la miniaturisation des appareils électroniques permettront la mise au point et la fabrication en série d'une prothèse portative qui offrira pour la première fois la possibilité d'un appareillage aux nombreux sourds profonds qui étaient jusqu'à présent réduits dans leurs contacts sociaux à la seule lecture labiale.

---



BIBLIOGRAPHIE

- (1) J.C. LAFON : "Message et Phonétique"  
Presses universitaires de France 1961 p. 167
- (2) J.C. LAFON : "Principes de transmission de la parole dans une zone fréquentielle limitée et application à l'appareillage du sourd".  
C.R. Ac. des Sc. t. 253 p. 327-328 10/7/1961
- (3) J.C. LAFON - R. ISAAC - A. MORGON - A. BRISSOT  
"Etude expérimentale d'un appareil amplificateur pour sourd".  
C.R. Ac. des Sc. 1962
- (4) J. MERVANT : "Nouvelles expériences d'éducation auditive avec les enfants réputés inappareillables".  
Journal français d'O.R.L. 11/7/1962 p.973-981
- (5) J.C. LAFON - R. ISAAC  
"Prothèse acoustique adaptée aux restes auditifs du sourd profond".  
C.R. Ac. des Sc. t. 257 p. 3707-3709  
4 décembre 1963
- 6) J.C. LAFON - R. ISAAC  
"Un nouvel appareil amplificateur pour sourds profonds - Données acoustiques et phonétiques".  
C.R. des Cinquièmes Journées d'Etudes de la Société Belge d'Audiophonologie  
Bruxelles - mars 1964 p. 20-22

(7) R. ISAAC - J.C. LAFON

"Un nouvel appareil amplificateur pour sourds profonds - Données électroniques".

C.R. des Cinquièmes Journées d'Etudes de la Société Belge d'Audiophonologie

Bruxelles - mars 1964 p. 23-28

(8) H. MERVANT :

"Résultats obtenus avec l'appareil à compensation du Dr. J.C. LAFON"

Revue "Rééducation Orthophonique"

mars-avril 1965 3ème année n° 10  
p. 55-59

## TABLE DES MATIERES

|                                                                 |        |
|-----------------------------------------------------------------|--------|
| - <u>INTRODUCTION</u> .....                                     | page 1 |
| - <u>CHAPITRE I</u> : STRUCTURE PHYSIQUE DU MESSAGE             |        |
| .... ACoustIQUE DE LA PAROLE .....                              | 3      |
| A - Généralités .....                                           | 3      |
| B - Analyse spectrale instantanée .....                         | 3      |
| C - Phonétique acoustique .....                                 | 5      |
| - <u>CHAPITRE II</u> : ETUDE COMPAREE DE LA PERCEPTION DE LA    |        |
| ..... PAROLE CHEZ L'INDIVIDU NORMAL ET CHEZ                     |        |
| LE SOURD PROFOND .....                                          | 7      |
| A - Surdité acquise et surdité congénitale .....             | 7      |
| B - La surdité profonde .....                                  | 8      |
| C - Mécanisme de l'audition .....                              | 8      |
| - <u>CHAPITRE III</u> : AMPLIFICATEUR ADAPTE AU SOURD PROFOND : |        |
| PREMIERE REALISATION .....                                      | 12     |
| A - Amplification et surdité profonde .....                    | 12     |
| B - Principe du premier appareil réalisé .....                | 14     |
| C - Description .....                                           | 15     |
| D - Conclusion .....                                            | 17     |
| - <u>CHAPITRE IV</u> : AMPLIFICATEUR ADAPTE AU SOURD PROFOND :  |        |
| DEUXIEME ET TROISIEME REALISATION .....                         | 18     |
| A - Principe initial .....                                      | 18     |
| B - Principe amélioré .....                                   | 19     |
| C - Choix des coefficients de surtension .....                  | 20     |
| D - Description du deuxième appareil réalisé .....           | 24     |
| E - Compensation double .....                                   | 32     |
| F - Description du troisième appareil réalisé .....          | 34     |

- CHAPITRE V : RESULTATS ..... page 45

A - Appareil à compensation simple ;  
mise en oeuvre et utilisation ..... 45

B - Résultats obtenus ..... 46

C - Appareil à double compensation :  
mise en oeuvre et utilisation ..... 48

D - Appareil à double compensation :  
résultats des analyses ..... 49

- CONCLUSION ..... 51

- BIBLIOGRAPHIE ..... 52

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté :

"Les systèmes d'atterrissage sans visibilité"

VU :

Les Membres du Jury,

R. BERNARD

L. EYRAUD

J.C. LAFON

P. MOUNIER-KUHN

M. RICHARD

Vu et approuvé :

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

J. BRACONNIER

Vu et accordé le permis d'imprimer :

Lyon, le

13 JUIL 1965

Le Recteur,

Président du Conseil de l'Université

P. LOUIS





